

Marcelo Santos Portela

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA  
AMAZÔNICA MARUPÁ PARA TAMPO DE VIOLÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D  
Co-orientador: Prof. Octávio Inácio,  
Ph.D

Florianópolis

2014



Marcelo Santos Portela

## **ESTUDO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA AMAZÔNICA MARUPÁ PARA TAMPO DE VIOLÃO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de "Doutor em Engenharia Mecânica", e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2 de novembro de 2014.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D  
Orientador

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D  
(Presidente)  
Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Roberto Jordan, Dr.Eng  
Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Maurício Alves Loureiro,  
Ph.D  
Universidade Federal de Minas  
Gerais

---

Prof. José Maria Campos dos  
Santos. Dr.Eng  
Universidade Estadual de  
Campinas

---

Prof. Leonardo Fuks, Ph.D  
Universidade Federal do Rio do  
Janeiro

---

Prof. Andrey Ricardo da Silva,  
Ph.D  
Universidade Federal de Santa  
Catarina



“Tu que passas e ergues para mim o teu  
braço, antes que me faças mal, olha-me bem.

Eu sou o calor do teu lar nas noites frias de  
inverno;

Eu sou a sombra amiga que tu encontras  
quando caminhas sob o sol de agosto;

E os meus frutos são a frescura apetitosa  
que te sacia a sede nos caminhos.

Eu sou a trave amiga da tua casa, a tábua  
da tua mesa, a cama em que tu descansas e o  
lenho do teu barco.

Eu sou o cabo da tua enxada, a porta da tua  
morada, a madeira do teu berço e do teu próprio  
caixão.

Eu sou o pão da bondade e a flor da  
beleza.

Tu que passas, olha-me e não me faças  
mal”. (Alberto Veiga Simões, Portugal, 1914)



## AGRADECIMENTOS

Ofereço essa tese à memória de Antônio Bernardino Rodrigues de Miranda (Seu Antônio) que, conforme descreve o Jornal O Globo de 14 de fevereiro de 1981 (ano em que nasci), era “português, nascido em uma aldeia da Freguesia de Silva, perto de Barcelos, no Minho, tem a precisão e a paciência como características, a doçura como traço humano refletido nos olhos azuis e barbas brancas e é autodidata de uma profissão difícil”. Essa “profissão difícil” é a arte de transformar a madeira em música, ou seja, a *luteria*. Tornamo-nos amigos quando eu ainda era criança e mesmo após deixar de ter aulas de música com sua esposa Sueli, continuei a freqüentar a casa de vila e a me alimentar daquele universo lúdico. Com certeza, tanto ele quanto sua esposa são responsáveis pelo início do meu deslumbramento com a música e os instrumentos musicais e sou muito grato a eles.

Gostaria de ressaltar a importância do Programa Institucional de Bolsas de Doutorado Sanduíche no Exterior da CAPES, que me permitiu, através da colaboração entre a UFSC e o Instituto Politécnico do Porto, em Portugal, realizar uma importante etapa do trabalho de pesquisa no Laboratório de Acústica Musical (LAM-ESMAE). Neste ambiente, tive a honra e o prazer de aprender muito sobre acústica musical com Octavio Inácio, Luís Henrique e Rui Ribeiro.

Aliás, a estada em Portugal não poderia ter sido mais acolhedora, graças à amizade e a parceria de Alex Miranda, Maria Miguel, Miguel Arruda, André Perrotta, Agostinho, Nuno, Eduardo e tantos outros “gajos” do Porto e que me fizeram sentir em casa por muitos meses. Também sou muito grato aos amigos que me abrigaram em outras cidades como o Seb, Marcos Lenzi, Martine e Bruno Masiero.

A relação com os artesãos que dedicam suas vidas a esculpir madeira em som tem mudado radicalmente minha forma de enxergar os instrumentos musicais. Pelos ensinamentos que não couberam nesta tese, minha sincera gratidão aos *luthiers* Homero Nardy (SBC-SP), Toninho das Violas (Porto), Joaquim Capela (Minho), Fernando Meireles (Coimbra), Fernando Portela (Viana do Castelo), Domingos e Alfredo Machado (Museu dos Cordofones - Braga), José Gonçalves (Braga), Paulo Meirinhos (Miranda do Douro), Oscar Cardoso (Lisboa), Victor Gama (Sintra), Alfredo (Porto), Rogério Franchi (Florianópolis) e Sidnei Vidal (Florianópolis). Devo especial referência à disponibilidade dos especialistas Antônio Pinto Carvalho (*APC Instruments* - Braga) no preparo dos tampos soltos analisados nesta tese; à família Ralha do Porto (Miguel e Tiago) na confecção com precisão

das amostras usadas para o levantamento das propriedades mecânicas das madeiras e ao Pedro Caldeira Cabral (Lisboa) pelas informações abundantes e precisas sobre o universo dos cordofones.

Ao grande guerreiro Rubens Gomes e a toda a equipe da OELA pela colaboração com essa pesquisa e pela doação do violão e todo o material para os testes com madeiras amazônicas, bem como ao Prof. Orestes Alarcon (UFSC) por ter me apresentado à ONG e me acompanhado na viagem à Amazônia. Também considero ter tido bastante sorte em contar com a Prof<sup>a</sup>. Poliana Dias de Moraes (GIEM, UFSC), que muito contribuiu com a minha qualificação e auxiliou na medição do teor de umidade e densidade das amostras de madeira.

Atravessar esses quase cinco anos dentro da UFSC não teriam sido possível sem o esmero dos professores Arcanjo Lenzi, Roberto Jordan e Júlio Cordioli, além do companheirismo dos colegas Gregório Azevedo, Kauê Werner, Olavo da Silva, Luiz Lenzi, William Fonseca, Eric Brandão entre outros. Em especial, os amigos Leandro Barbosa e Paulo Mareze, pela valiosa ajuda com dados experimentais, e ao Gustavo Martins, pelas inúmeras explicações sobre o software de simulação numérica.

Com certeza, minha visão sobre música e engenharia virou do avesso desde que passei a conviver com a rapaziada das “humanas”... por isso, reconheço os esforços dos amigos Izomar Lacerda, Laura Castillo, Kaio Hoffmann, Bianca Oliveira, Marcelo Spaolonse, Tatiana Dassi, Vinícius Anaissi, Fernanda Marcon entre outros, em me ajudar a lidar com os constantes dilemas. À família Sens, Gafieira Light, Daniel Choma, Tati Costa, Osvaldo Pomar, Geraldo Vargas, Marco Arruda e Beto Vieira, obrigado pelo apoio sempre.

Finalmente, chego ao fim, fazendo referência ao início de tudo, pois sem esse alicerce nada teria sido possível. À minha querida família (Vera, Marvio e Lydia), que agora cresce com dois presentes que ganhei ao longo desses anos de doutorado: minha companheira Gabriele e minha filha Aimê são, agora, parte da história que segue com essa mistura de engenharia e arte, abrindo caminhos para novas possibilidades.



## RESUMO

Apesar do esforço científico para iluminar o conhecimento das propriedades acústicas que caracterizam os instrumentos musicais, sua construção ainda se baseia principalmente na arte e tradição provenientes da experiência passada de uma geração para a outra. Dentro desse contexto, a seleção de espécies madeireiras continua a ser um fator impactante na concepção de componentes de instrumentos musicais, por razões estéticas, estruturais e acústicas. Como objeto de análise, o projeto envolve a pesquisa de espécies tropicais nativas da Amazônia, oferecendo suporte na seleção de possíveis substitutas para espécies tradicionais que se encontram em extinção. O presente trabalho evidencia a importância da caracterização das propriedades dos materiais relacionadas com o comportamento vibracional de componentes do instrumento. As técnicas desenvolvidas podem ajudar os fabricantes a buscar novas ferramentas e critérios para seu ofício, como considerar o amortecimento como uma característica vibratória muito importante para a madeira. No que diz respeito às técnicas experimentais, o procedimento proposto proporciona uma medição mais rápida e precisa das propriedades de um instrumento de cordas. O trabalho desenvolve uma análise integrada numérico-experimental do tampo do violão clássico através da criação de um modelo numérico por elementos finitos o mais próximo o possível do real, ao mesmo tempo em que um instrumento nos mesmos moldes foi adquirido através de um convênio com uma oficina-escola de construção de violões, para as análises experimentais. O tampo de madeira amazônica foi comparado a tampos idênticos, fabricados com duas espécies tradicionalmente usadas na fabricação de instrumentos musicais, a fim de validar sua aptidão para esse fim. Critérios de qualidade foram aplicados tanto ao tampo livre quanto ao mesmo montado em um violão finalizado. Os resultados mostraram que a espécie estudada tem grande potencial para ser uma alternativa aos materiais de referência na construção de instrumentos musicais de qualidade.

**Palavras-chave:** Acústica Musical, Violão clássico, Lutheria, Luteria, Madeiras amazônicas, Análise modal, Propriedades mecânicas.



## ABSTRACT

Despite the scientific effort to illuminate the knowledge of the acoustic properties that delineate the main characteristics of musical instruments, their construction is still based mainly on the art and tradition from the past experience from one generation to another. Within this context, the selection of timber species continues to be a crucial factor in musical instruments design, for aesthetic, structural and acoustic reasons. As an object of analysis, the thesis involves the research of native tropical species from the Amazon, offering support in the selection of a possible sustainable replacement for traditional species, which are endangered. This study highlights the importance of the characterization of material properties related to the vibrational behavior of musical instrument components. The techniques here presented can help manufacturers to seek new tools and criteria for their craft, as consider damping as a very important vibrational feature for wood. With respect to experimental techniques, the proposed procedure provides a faster and accurate measurement of stringed instrument properties. An integrated numerical-experimental analysis of the classical guitar soundboard is achieved by comparing a finite element model and experimental modal analysis data of the instrument components, acquired through an agreement with a workshop-school for this purpose. The Amazon timber soundboard (marupá) was compared to other identical soundboards, manufactured with species traditionally used in musical instruments manufacturing, in order to validate their suitability for this purpose. Quality criteria were applied to both free and clamped boundary conditions, when the soundboard is mounted on a finalized guitar. The results show that the studied species have great potential to replace traditional materials when building professional classical guitars.

**Keywords:** Musical Acoustics, Classical guitar, Lutherie, Amazon woods, Modal analysis, Mechanical properties.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Elementos do violão clássico.....	32
Figura 2.2 - Elementos do violão clássico fabricados de madeira amazônica.....	33
Figura 2.3 - Projeto de barramento harmônico básico.....	35
Figura 2.4 - Elementos do violão relacionados às diferentes faixas de frequência.....	37
Figura 2.5 - Espectro sonoro de violão clássico para uma força senoidal aplicada perpendicularmente ao cavalete.....	38
Figura 2.6 - Escala do violão com as respectivas notas e frequências associadas.....	38
Figura 2.7 - Modo (1,1) do tampo montado.....	39
Figura 2.8 - Modo (2,1) do tampo montado.....	40
Figura 2.9 - Modo (1,2) do tampo montado.....	40
Figura 2.10 - Modo (3,1) do tampo montado.....	41
Figura 2.11 - Corte transversal de um tronco.....	43
Figura 2.12 - Diferentes formas de serragem da madeira: radial e tangencial.....	44
Figura 2.13 - Caminhão com mogno.....	52
Figura 2.14 - Correlação entre o módulo de Young versus densidade da madeira.....	54
Figura 2.15 - Gráfico comparativo de propriedades para madeiras, traçando a velocidade do som, $c$ , contra a densidade, $\rho$ .....	55
Figura 3.1 - Cortes transversal e longitudinal das amostras.....	64
Figura 3.2 - Cadeia de instrumentos utilizada na caracterização de materiais.....	64
Figura 3.3 - Viga homogênea.....	65
Figura 3.4 - Método da banda de meia potência.....	66
Figura 3.5 - Bancada experimental para teste com vigas.....	67
Figura 3.6 - (a) Receptância das 10 amostras longitudinais de abeto, 3 impactos por amostra (b) Função Coerência.....	67
Figura 3.7 - (a) Receptância das 10 amostras transversais de abeto, 3 impactos por amostra (b) Função Coerência.....	68
Figura 3.8 - Módulo de elasticidade longitudinal em função da frequência para o abeto.....	69
Figura 3.9 - Módulo de elasticidade longitudinal em função da frequência para o cedro.....	69
Figura 3.10 - Módulo de elasticidade longitudinal em função da frequência para o marupá.....	70

Figura 3.11 - Módulo de elasticidade transversal em função da frequência para o abeto. ....	70
Figura 3.12 - Módulo de elasticidade transversal em função da frequência para o cedro. ....	71
Figura 3.13 - Módulo de elasticidade transversal em função da frequência para o marupá. ....	71
Figura 3.14 - Fator de perda longitudinal em função da frequência para o abeto. ....	72
Figura 3.15 - Fator de perda longitudinal em função da frequência para o cedro. ....	72
Figura 3.16 - Fator de perda longitudinal em função da frequência para o marupá. ....	73
Figura 3.17 - Fator de perda transversal em função da frequência para o abeto. ....	73
Figura 3.18 - Fator de perda transversal em função da frequência para o cedro. ....	74
Figura 3.19 - Fator de perda transversal em função da frequência para o marupá. ....	74
Figura 3.20 - Modelo numérico da viga .....	75
Figura 3.21 - Cinco primeiros modos de flexão da viga longitudinal modelada. ....	76
Figura 3.22 - Receptâncias das amostras obtidas numérica e experimentalmente. ....	77
Figura 4.1 - Tampos livres usados na comparação das três espécies... 81	
Figura 4.2 - Exemplo de barramento harmônico (projeto <i>Torres</i> ) comum a todos os tampos analisados. Orientação das fibras na direção vertical da figura. ....	82
Figura 4.3 - Geometria típica das travessas de reforço .....	82
Figura 4.4 - Geometria típica das barras de reforço da boca .....	83
Figura 4.5 - Posicionamento das barras de reforço .....	83
Figura 4.6 - Geometria de uma barra harmônica .....	84
Figura 4.7 - Posicionamento das barras harmônicas .....	84
Figura 4.8 - Bancada experimental para os tampos livres.....	87
Figura 4.9 - Bancada experimental sendo utilizada. ....	87
Figura 4.10 - Distribuição dos pontos experimentais medidos. ....	89
Figura 4.11 - Geometria do tampo simulado e sua respectiva malha..	91
Figura 5.1 - Comparação entre a média das FRFs experimentais e numérica do tampo de abeto. ....	97
Figura 5.2 - Comparação entre a média das FRFs experimentais e numérico do tampo de cedro. ....	97

Figura 5.3 – Comparação entre a média das FRFs experimentais e numérica do tampo de marupá. ....	98
Figura 5.4 – Aceleração experimental em faixa ampla de frequências, filtrada em 1/3 de oitava. ....	100
Figura 5.5 – Sistema de coordenadas usado na comparação dos modos. ....	101
Figura 5.6 – Modo #1. Padrões de vibração do modo natural (1,1) dos tampos livres analisados. ....	102
Figura 5.7 – Modo #2. Padrões de vibração do modo natural (2,1) dos tampos livres analisados. ....	103
Figura 5.8 – Modo #3. Padrões de vibração do modo natural (0,2) dos tampos livres analisados. ....	104
Figura 5.9 – Modo #4. Padrões de vibração do modo natural (1,2) dos tampos livres analisados. ....	105
Figura 5.10 – Modo #5. Padrões de vibração do modo natural (3,1) dos tampos livres analisados. ....	106
Figura 5.11 – Modo #6. Padrões de vibração do modo natural (4,1) dos tampos livres analisados. ....	107
Figura 5.12 – Modo #7. Padrões de vibração do modo natural (0,3) dos tampos livres analisados. ....	108
Figura 5.13 – Modo #8. Padrões de vibração do modo natural (1,3) dos tampos livres analisados. ....	109
Figura 5.14 – AUTOMAC para as três espécies. ....	110
Figura 5.15 – MAC comparativo entre as espécies. ....	112
Figura 6.1 – Construção do violão clássico de madeiras amazônicas na oficina da OELA. ....	117
Figura 6.2 – Bancada experimental para o tampo montado. ....	118
Figura 6.3 – Principais modos de baixa frequência do tampo de violão de marupá montado. ....	120
Figura 6.4 – FRF típica (baixa frequência) de um violão de tampo de abeto em comparação com o tampo de marupá analisado. Picos de ressonância associados a notas no pentagrama. ....	122
Figura 6.4 – FRF filtrada em bandas de terço de oitava de um típico violão de tampo de abeto em comparação com o tampo de marupá analisado. ....	125
Figura 6.5 – Centróide espectral do som da 6ª corda do violão de tampo de abeto em comparação com o violão de tampo de marupá. ....	128
Figura 6.6 – FRF do tampo de marupá em bandas de terço de oitava combinadas. ....	129
Figura 6.7 – FRF típica do tampo de marupá em bandas de terço de oitava combinadas. ....	130





## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Características anatômicas das espécies amazônicas pré-selecionadas.....	53
Tabela 2.2- Valores de módulo de Young e dureza em função da densidade ( $\rho$ ) em $\text{kg/m}^3$ para madeiras.....	57
Tabela 3.1- Valores de densidade média absoluta ( $\rho$ ) para as madeiras analisadas. ....	63
Tabela 3.2- Valor médio do módulo de elasticidade e do fator de perda para as três espécies, nas direções longitudinal e transversal aos veios da madeira. ....	75
Tabela 4.1- Instrumentação e hardware de medição.....	88
Tabela 4.2- Propriedades dos materiais simulados. ....	93
Tabela 4.3- Propriedades aplicadas às barras harmônicas e de reforço.	94
Tabela 5.1- Erros percentuais das frequências naturais numéricas em relação aos valores experimentais para os modos relacionados. ....	98
Tabela 5.2- Fator de qualidade (Q) para os modos experimentais.....	99
Tabela 6.1- Frequência, fator Q e distância da nota mais próxima das primeiras seis ressonâncias para o violão de tampo de marupá. ....	121
Tabela 6.2- Frequência, fator Q e distância da nota mais próxima das primeiras cinco ressonâncias para o violão de tampo de abeto. ....	122
Tabela 6.3 - Frequências de ocorrência dos modos (3,1) e (2,2) na literatura. ....	124
Tabela 6.4 - Resultado dos critérios propostos por Haines e Chang. .	133
Tabela 6.5 - Resultados dos critérios propostos por Ono.....	133



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GL – Graus de Liberdade  
FRF – Função Resposta em Frequência  
FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier)  
CFRP – Polímeros com Fibra de Carbono Reforçado  
LPF – Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA  
FEM – *Finite Element Method* (Método de Elementos Finitos)  
AMF – Ângulo de microfibras  
INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia  
OELA – Oficina Escola de Lutheria da Amazônia  
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
FUNREI – Fundação de Ensino Superior de São João Del Rei  
CBO - Classificação Brasileira de Ocupações  
ONG - Organização Não Governamental  
LVA – Laboratório de Acústica e Vibração (UFSC)  
LAM – Laboratório de Acústica Musical (ESMAE)  
ESMAE – Escola Superior de Música, Artes e Espectáculo do Instituto Politécnico do Porto (Portugal)  
GIEM – Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira (UFSC)  
FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier)  
LSCE – *Least Squares Complex Exponential* (Técnica exponencial complexa de mínimos quadrados)  
LSFD – *Least Squares Frequency Domain* (Técnica no domínio da frequência de mínimos quadrados)  
MAC – *Modal Assurance Criterion* (Critério de Garantia Modal)  
AUTOMAC – MAC para estimativa dos modos dentro de um mesmo modelo modal  
JND – *Just Noticeable Difference* (Diferenças Mínimas Notáveis)



## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$  – velocidade de ondas longitudinais  
 $\rho$  – massa específica ou densidade  
 $\eta$  – amortecimento viscoelástico (fator de perda)  
 $\delta$  – decaimento logarítmico  
 $\psi$  – ângulo de perda  
 $\nu$  – coeficiente de Poisson do material  
 $f_r$  – frequência de ressonância  
UR – umidade relativa  
 $P_v$  – peso verde  
 $P_s$  – peso seco  
 $D_f$  – resolução em frequência  
 $u, v, w$  – graus de liberdade, três deslocamentos  
 $\phi_1, \phi_2$  – graus de liberdade, rotações  
 $E_y$  – módulo de Young na direção paralela à linha das fibras de madeira  
 $E_x$  – módulo de Young perpendicular às fibras da madeira  
 $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$  – módulos de cisalhamento nas direções principais  
G (sol), A (lá), B (si), C (dó), D (ré), E (mi), F (fá) – notas musicais na nomenclatura inglesa  
# – sustenido  
 $b$  – bemol  
 $\ell$  – pedaço do comprimento de uma corda  
 $m$  – massa  
 $\mu$  – densidade linear  
 $\kappa$  – critério de qualidade proposto por Ono  
 $\gamma$  – densidade específica  
Q – fator de qualidade



## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	23
1.1	Contexto econômico e sócio-ambiental	23
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivo Geral	26
1.2.2	Objetivos Específicos	26
2	<b>CONCEITOS GERAIS</b>	27
2.1	Acústica musical	27
2.1.1	O paradoxo do instrumento no laboratório	28
2.1.2	Palavras de alguns pioneiros	29
2.3	O violão clássico	31
2.3.1	Partes físicas do violão	31
2.3.2	Importância do tampo	32
2.3.3	Barramento harmônico	34
2.3.4	Projeto de leque harmônico adotado	34
2.3.5	Comportamento em diferentes regimes de frequência	35
2.3.6	Resposta em frequência de violões	37
2.3.7	Modos de vibração do tampo montado	38
2.4	A madeira	41
2.4.1	Nomenclatura	42
2.4.2	Anatomia	42
2.4.3	Figura	44
2.4.4	Textura	44
2.4.5	Grã	45
2.4.6	Teor de umidade inicial	45
2.4.7	Trabalhabilidade	45
2.4.8	Coníferas e folhosas ( <i>Hardwood</i> e <i>Softwood</i> )	46

2.4.9	A madeira como material de engenharia	46
2.5	Madeira ressonante	48
2.5.1	Madeiras para tampo (Cordofones)	49
2.5.2	Madeiras tradicionais	50
2.5.3	Madeiras alternativas da Amazônia	52
2.6	O Luthier	55
2.7	Propriedades físicas e mecânicas da madeira	56
2.7.1	Propriedades acústicas da madeira	57
2.7.2	Velocidade do som	58
2.7.3	Fator de perda estrutural (amortecimento)	58
2.8	Relações das propriedades com diferentes escalas de observação	59
2.9	A organização da parede celular	60
2.10	Anéis de crescimento	60
3	<b>CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS</b>	62
3.1	Obtenção de amostras	62
3.2	Determinação da densidade da madeira	62
3.3	Determinação do teor de umidade da madeira	63
3.4	Preparo das amostras em forma de viga	63
3.5	Levantamento das propriedades dinâmicas	64
3.6	Validação e ajuste de propriedades	75
4	<b>ANÁLISE MODAL DO TAMPO</b>	79
4.1	Análise do tampo do violão em condição livre	80
4.2	Análise modal experimental do tampo livre	85
4.2.1	Bancada experimental	86
4.2.2	Procedimentos adotados	88
4.3	Análise modal numérica do tampo livre	90



5	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TAMPO LIVRE</b>	95
5.1	Funções resposta em frequência (FRFs)	95
5.2	Formas modais	100
5.3	Critério MAC	109
5.4	Considerações sobre os resultados	113
6	<b>QUALIDADE DO INSTRUMENTO FINAL</b>	115
6.1	Critérios de avaliação de qualidade	116
6.2	Resultados do tampo de marupá montado em um violão	117
6.2.1	Procedimentos adotados	118
6.2.2	Resultados da análise modal experimental do tampo montado	119
6.3	Análise das altas frequências para avaliação do timbre	124
6.4	Critérios objetivos aplicados às propriedades mecânicas da madeira	131
6.5	Experiência dos construtores	134
6.6	Critérios subjetivos: os testes cegos	135
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	138
	REFERÊNCIAS	141



# 1 INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas, acústicas e estéticas da madeira fazem dela o material exclusivo para a fabricação de muitos produtos. Ao redor do mundo, centenas de espécies de madeira ainda estão disponíveis para aplicação em instrumentos musicais. Ao longo de gerações, as espécies mais adequadas vêm sendo selecionadas para diversas funções, seja por meio da observação do resultado de sucessivas tentativas, ou através da identificação sistemática de parâmetros mecânicos específicos [Wegst, 2006].

Relacionando-se as propriedades mecânicas do material, tais como o módulo de elasticidade e amortecimento, com fatores ligados diretamente ao processo de manufatura, como o grau de dificuldade em submetê-lo a processos de corte e desbaste e também as condições de umidade em que a madeira se encontra, é possível analisar e justificar a escolha de uma determinada espécie.

Há muitos anos, os tampos de violões clássicos têm sido feitos, em sua grande maioria, a partir de duas espécies de madeira, o abeto da Noruega (*Picea abies*) e o cedro do Canadá (*Thuja plicata*), que se encontram cada vez mais escassas, devido ao uso não planejado ao longo de muitos anos [Granger e Trump, 2012]. Como ocorre uma significativa superposição das propriedades de uma espécie em relação a outras, é possível considerar a substituição de espécies de madeira usadas tradicionalmente por opções alternativas. Espera-se que tal substituição tenha um mínimo impacto na qualidade acústica do instrumento, sendo esta tese um passo na evolução científica para os métodos de análise que podem provar isso. Para tal, cada elemento do instrumento deve ser projetado e construído levando em consideração tolerâncias relacionadas às suas propriedades mecânicas referenciadas aos resultados de qualidade esperados. Essas tolerâncias acústicas e suas relações com o conceito de qualidade necessitam de um estudo mais aprofundado, aproveitando as tecnologias para análise vibroacústica disponíveis atualmente.

## 1.1 Contexto econômico e sócio-ambiental

Segundo dados da ABEMUSICA [ABEMUSICA] o Brasil importa mais de R\$100 milhões por ano em madeiras para a fabricação de instrumentos musicais de corda e sopro. Ainda assim, do total de instrumentos de corda vendidos no país por mês, cerca de 25% são feitos no Brasil e o restante são importados.

Considerando esse contexto, ainda são encontrados pouquíssimos trabalhos científicos a respeito da adequação de novas espécies de madeira na fabricação de instrumentos musicais.

Alguns estudos envolvendo as espécies nativas da Amazônia visando encontrar alternativas às madeiras importadas na fabricação de instrumentos musicais já vem sendo desenvolvidos no Brasil desde 1982. Por serem raras, as madeiras importadas apresentam, já desde essa época, altíssimo valor econômico, o que desestimulava a produção de instrumentos no Brasil. Ao longo dessas pesquisas, realizadas pelo Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro [LPF, 1989], foram identificadas mais de 50 madeiras candidatas à substituição das importadas para a fabricação de instrumentos. No entanto, neste contexto, a tradição estabelecida entre músicos e construtores desempenha um papel fundamental e existe claramente no mercado uma tradição de escolha pelas madeiras nobres importadas ou mesmo de espécies nacionais consagradas em certos instrumentos, como o pau-brasil (*Caesalpinia echinata Lam*) na fabricação do arco do violino. A árvore, conhecida mundialmente como Pernambuco, só é encontrada na Mata Atlântica, está protegida pela legislação nacional, sendo seu corte proibido. O mogno (*Swietenia macrophylla*), outra espécie ameaçada de extinção, é utilizada em diversos tipos de instrumentos de corda. Outra madeira brasileira proibida de ser usada pela indústria é o jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), sendo sua comercialização monitorada mundialmente [Instrução Normativa MMA nº 6, 2008].

O Brasil possui a maior área de florestas tropicais do mundo. No entanto, é também um dos países com maior taxa de desmatamento mundial. Informações da FAO (*Food and Agriculture Organization*) indicam que entre os anos de 2000 e 2005, o desmatamento no Brasil contribuiu com 42% da perda de cobertura florestal no mundo. Estudos do IBAMA (2010) indicam que as áreas desmatadas da Floresta Amazônica, da Mata Atlântica e do Cerrado somam 2,5 milhões de km<sup>2</sup> (250 milhões de hectares), quase 30% do território brasileiro, ou a soma das superfícies formadas pelos Estados das Regiões Nordeste e Sudeste. Quanto à Mata Atlântica, restam atualmente apenas cerca de 7% de sua área original, que se estendia do Rio Grande do Sul ao Piauí.

Além da perda da biodiversidade, o desmatamento é frequentemente acompanhado por conflitos pela posse da terra e violência, principalmente, contra povos indígenas, populações tradicionais e pequenos agricultores.

Atualmente, a indústria madeireira amazônica se destina principalmente ao mercado nacional. De acordo com pesquisa do Imazon, os brasileiros são responsáveis pelo consumo de cerca de 64% da madeira processada na Amazônia. Em 2004, isso significou cerca de 15,68 milhões de metros cúbicos de madeira em tora, ou quase 4 milhões de árvores.

O Código Florestal Brasileiro tornou obrigatória a realização do manejo para utilização das florestas da Amazônia. Para que seja legal, qualquer atividade florestal necessita de um plano de manejo autorizado pelo IBAMA ou órgão estadual competente. Entretanto, se por um lado a imensidão da Amazônia dificulta a ação de fiscalização, permitindo a continuidade de práticas corruptas e ilegais, de outro, apenas com a aplicação da legislação não é possível garantir as melhores práticas florestais.

Os princípios e critérios estabelecidos pelo *Forest Stewardship Council* [FSC] procuram garantir a exploração dos recursos florestais de forma ambientalmente correta, socialmente benéfica e economicamente viável. Do ponto de vista ambiental, isto significa que o manejo florestal deve respeitar a integridade da floresta e sua capacidade de regeneração. Além disso, um empreendimento socialmente benéfico deve considerar os direitos de seus trabalhadores e das comunidades próximas à área explorada. As populações tradicionais devem ter seu direito ao uso da terra reconhecido e as leis trabalhistas devem ser rigorosamente cumpridas.

É reconhecido que usar espécies alternativas da Amazônia com certificado de origem de planos de manejo sustentável em instrumentos musicais de alto padrão é valorização certa e mercado garantido dessas espécies no exterior, principalmente na Europa, com enorme tradição musical.

## **1.2 Objetivos**

Este projeto de pesquisa aborda métodos que podem orientar os construtores de violões no processo de caracterização e comparação de madeiras alternativas. Através deste trabalho, será possível se familiarizar com o campo da ciência dos materiais e suas aplicações em instrumentos musicais.

## 1.2.1 Objetivo Geral

Determinar o desempenho acústico e a viabilidade de madeiras amazônicas para a construção de instrumentos musicais.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as características físicas dos materiais que estão relacionados com a qualidade do som que produzem. Foram realizados experimentos com amostras de diferentes tipos de madeira para medir propriedades tais como densidade, módulo de elasticidade e amortecimento. Algumas propriedades dessas madeiras foram determinadas através da análise modal experimental de componentes de um violão clássico<sup>1</sup>;
- Aplicar a instrumentos musicais técnicas de modelação numéricas atualmente já utilizadas em engenharia mecânica, mas ainda pouco exploradas em instrumentos musicais;
- Validar tecnicamente as madeiras alternativas brasileiras com essas propriedades, facilitar a escolha apropriada das espécies pela indústria e pelos artesãos, bem como oferecer alternativas nacionais aos músicos profissionais e aos madeireiros que manejam a floresta amazônica.

---

<sup>1</sup> Para o estudo da aplicação das espécies selecionadas para os diferentes componentes de instrumentos musicais, foi decidido que o violão clássico seria o instrumento escolhido, por ser popularmente conhecido e difundido na cultura popular e erudita.

## 2 CONCEITOS GERAIS

Como não se tem notícia de muitos trabalhos acadêmicos na área de acústica musical usando madeiras alternativas, foi de grande importância uma ampla revisão da literatura relacionada ao tema.

As características dos violões foram levantadas a partir de entrevistas com diversos construtores e revendedores de instrumentos de cordas. Foi feita uma análise das principais madeiras utilizadas nos violões e suas características diretas com as relações físicas e acústicas.

As fontes de dados sobre as madeiras e suas propriedades foram Haines (1979), Yano et al.(1997), Sadie e Tyrell (2001), Bucur (2006), o “Banco de dados de madeiras brasileiras” [IBAMA/LPF] e dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e do Instituto de Pesquisas da Amazônia (INPA) de Manaus.

A definição deste tema para o estudo de madeiras amazônicas resultou da observação, nestas fontes de dados, da demanda de informações sobre as propriedades acústicas das madeiras usadas em instrumentos musicais. Ficou claro que a caracterização acústica de madeiras alternativas, que ainda não encontraram mercado no Brasil ou no exterior, poderá ter um significado especial para a viabilização dos planos de manejo florestal sustentável, principalmente daqueles em escala comunitária.

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos fundamentais relacionados à área de pesquisa conhecida como Acústica Musical. Também é descrito o instrumento musical objeto desta tese, o violão clássico, e são apresentadas as características de seu material primordial, a madeira.

### 2.1 Acústica musical

A acústica musical deve ser encarada como uma ciência interdisciplinar, que envolve diversas áreas, incluindo física, acústica, psicoacústica e música. Há a discussão sobre se o campo deve ser chamado de “acústica da música”, ao invés de “acústica musical”, uma vez que a palavra “musical” poderia conotar algo que tem a ver com o talento ou habilidade como músicos [Sundberg, 2001].

Dentro do campo de conhecimento em acústica, cabe considerar alguns tópicos importantes como o processamento de sinais, a acústica de salas e a análise de vibração em estruturas, que englobam conceitos de percepção auditiva e modelagem física de objetos sonoros, visando

definir parâmetros de qualidade que permitam uma avaliação objetiva de instrumentos musicais. Já a base de conhecimento em música oferece a possibilidade de levantar outras características da qualidade dos instrumentos, no que diz respeito a conceitos musicais como a afinação, escalas e sua relação com a performance musical.

Ao longo da história, muitos instrumentos musicais evoluíram por uma sucessão de tentativas, erros e planejamentos, atendendo às demandas dos músicos e a criatividade dos construtores para desenvolvimentos específicos. Os responsáveis por esse desenvolvimento são os construtores de instrumentos chamados de *luthiers* (item 2.6). Assim, instrumentos e técnicas de execução atingiram um bom nível de sofisticação mesmo antes de se tornarem objeto de estudo científico no século passado.

A acústica de instrumentos visa então beneficiar os músicos, em sua prática ou desempenho, os fabricantes de instrumentos, ao sugerir alterações de design de instrumentos existentes para atingir metas específicas (custo, peso, timbre<sup>2</sup>) ou para fazer novos instrumentos, para encontrar materiais alternativos, etc.

### **2.1.1 O paradoxo do instrumento no laboratório**

De uma forma geral, músicos experientes são capazes de avaliar rapidamente se gostam ou não de um instrumento, sem conhecimento do funcionamento físico, usando apenas a sua percepção. Os complexos e variados fatores de julgamento usados por estes tornam difícil a unificação da avaliação subjetiva e sua correlação com dados acústicos objetivos mensuráveis. Tais parâmetros são extremamente dependentes de fatores subjetivos, por isso permanecem bastante elusivos. São claras as dificuldades de usar parâmetros objetivos para avaliar questões essencialmente subjetivas da música [Bertsch e Brown, 2004]. Uma possível razão para tal seria um paradoxo: ao isolar o instrumento musical do musicista, do ambiente da sala e dos ouvintes, o cientista elimina os fatores subjetivos envolvidos, que são aqueles mais

---

<sup>2</sup> O timbre é uma característica subjetiva do som que permite diferenciar dois sons de altura e intensidade iguais. Resulta da correlação subjetiva de todas as propriedades do som que não influenciam diretamente a altura e sensação de intensidade, tais como: envelope temporal, distribuição da energia espectral, grau de inarmonicidade das componentes parciais. O transiente inicial e final também são fundamentais para a caracterização do timbre de um instrumento [Henrique, 2007].



intimamente ligados ao principal propósito da atividade musical, a expressividade.

Se um instrumento musical é isolado como um objeto físico, mensurável, pode-se aprender bastante sobre suas características intrínsecas, como as frequências naturais, direcionalidade de radiação e o funcionamento do objeto. Mas, para analisar o instrumento, o pesquisador precisa abstrair muitos elementos de uma cadeia completa que envolve desde a fonte sonora (músico/instrumento), passando pelo meio de transmissão (ar/sala) ao receptor (ouvinte). É fato que uma parte substancial da experiência musical está diretamente relacionada a quem e o que se está tocando, em que sala e quem está ouvindo. Nenhum instrumento toca sozinho e, mesmo se pudesse, como se pode verificar em experiências de performances automatizadas [UNSWTV, 2010], o conteúdo expressivo talvez seja pouco significativo. A tarefa de fazer julgamentos de qualidade independente do contexto musical é bastante complexa. É um grande desafio chegar a parâmetros mensuráveis que sejam significativos para o julgamento subjetivo do músico sobre a qualidade de um instrumento, pois requer uma boa dose de conhecimentos e habilidades que abrangem diferentes disciplinas. É por estes motivos que equipes interdisciplinares são tão importantes para este tipo de pesquisa. É evidente que os instrumentos musicais têm qualidades intrínsecas, que podem ser medidas de várias maneiras, mas essas qualidades só são significativas no contexto da capacidade de um músico expressar-se com o instrumento em questão. Apesar dos avanços na compreensão dos aspectos físicos dos instrumentos musicais, ainda somos dependentes da relevante opinião dos musicistas.

### **2.1.2 Palavras de alguns pioneiros**

Para ajudar a definir a acústica musical, e para orientação sobre o caminho entre o científico e artístico, pode-se olhar para os trabalhos de alguns dos pioneiros nesse campo.

Arthur Benade descreve acústica musical como "o ponto de encontro da música, a física da vibração, a ciência auditiva e habilidade musical" [Benade, 1990].

Donald Hall afirma que *"temos uma oportunidade única de ver a ciência e a arte trabalhando em conjunto. No caminho, eles são, por vezes, amigavelmente antagonistas, mas em última análise, são parceiros em nos ensinar o que é música e como ela funciona."* [Hall, 1991].

A introdução do livro sobre instrumentos musicais de Neville Fletcher e Thomas Rossing [Fletcher e Rossing, 1998] contém muitas passagens úteis sobre o caminho entre o objetivo e subjetivo, mas afirma que "a função principal da acústica (musical) é tentar entender todos os detalhes da produção do som de instrumentos tradicionais. Esta é a meta mais importante". Além disso, eles colocam que *"a história dos instrumentos musicais é quase tão antiga quanto a história da própria civilização, e os princípios estéticos nos quais os julgamentos de qualidade musical são baseados estão intimamente ligados com a cultura em que os instrumentos evoluíram. Um músico moderno, de educação ocidental, ou mesmo o ouvinte, pode fazer juízos críticos sobre determinados instrumentos ou performances em particular, mas, para serem válidos, os julgamentos devem ser feitos dentro do contexto cultural apropriado"*. Daí a importância também da etnomusicologia<sup>3</sup> nessa pesquisa. E continuam, *"não existe tal coisa como um instrumento ideal, mesmo no conceito (...). Assim, por exemplo, o som de um violino é julgado contra uma imagem mental de um violino perfeito construído a partir da experiência de violinos tocando música escrita para eles ao longo dos séculos. Um novo instrumento pode ser mais rico em qualidade de som superior e na capacidade de resposta, mas se ele não se encaixa nessa imagem, então não é o melhor violino (...). Nosso entendimento de uma determinada área será razoavelmente completo somente quando conhecermos as causas físicas da diferença entre um bom instrumento e outro julgado como de qualidade inferior. Só então podemos esperar que a ciência realmente ajude a música na evolução do projeto dos instrumentos musicais contemporâneos. É difícil para um cientista apontar o caminho sem que o problema tenha sido identificado adequadamente pelo músico ou pelo fabricante"*. O "problema identificado" se torna a meta de projeto, a chave da solução para os problemas específicos que prejudicam a qualidade de um instrumento.

Relacionado ao subjetivo, além do precioso trabalho publicado por Hermann von Helmholtz [Helmholtz, 1863], e algumas poucas publicações que se sucederam, ainda há muito trabalho a ser feito.

---

<sup>3</sup> Também conhecida como antropologia da música, ou mais propriamente etnografia da música, é a ciência que objetiva o estudo da música em seu contexto cultural ou o estudo da música como cultura [The Society for Ethnomusicology, 2010].

## 2.3 O violão clássico

A origem do violão é um pouco vaga. No entanto, algumas fontes sugerem que este instrumento teve sua origem na antiguidade, provavelmente no Egito, três mil anos antes de Cristo. Entre seus antepassados, pode-se citar a vihuela e o alaúde [Merino, 2008]. Duas hipóteses sobre como este instrumento surgiu foram apresentados por Emilio Pujol em uma conferência em Paris, em 1928: A primeira hipótese é que a palavra "guitarra" é derivada da chamada "*Khetara* grega", que com o domínio do Império Romano, passou a se chamar "Cítara romana", era também denominada de "Fidícula". (...) A segunda hipótese é de que o violão seria derivado do antigo "alaúde árabe" [Pujol apud Nogueira, 1991].

O mais provável é que o violão moderno descenda mais diretamente da guitarra renascentista, tornando-se popular por ser relativamente barato, portátil, melódico e harmônico, fácil de aprender a um nível amador. No entanto, muito trabalho é preciso para levá-lo ao nível profissional [Huber, 1994]. Nogueira [1991] também discorre sobre a origem do nome para a guitarra acústica, no caso, no Brasil, como sendo o aumentativo de viola para violão.

Foi o artesão Antônio de Torres Jurado que, em 1850, construiu o violão nos moldes que conhecemos hoje em dia. A padronização do formato facilitou o comércio e a divulgação do violão pelo mundo; por isso, Torres é considerado o pai do violão moderno [Courtinall, 1993; Huber, 1994; Dudeque, 1994].

Os violões fazem parte da classe dos cordofones, ou seja, instrumentos de cordas, assim como os violinos, os violoncelos e as violas. Os cordofones são característicos por possuírem caixas de ressonância projetadas para produzir sons a partir de excitações em suas cordas. As dimensões, espessuras e angulações são cuidadosamente regulados para alcançar este fim. Segundo Sloane (1989), aumentando o volume do corpo de um instrumento curvado (como a viola, o violoncelo e o contra-baixo) aumenta-se a ressonância dos graves. O mesmo se aplica aos violões. Logo, violões com as laterais mais largas acentuam mais os graves, e violões mais estreitos acentuam os médios na escala e também sofrem uma redução de volume sonoro.

### 2.3.1 Partes físicas do violão

As principais partes de madeira usadas no violão clássico são: tampo, laterais, fundos, braço, escala e ponte (cavelete). A Figura 2.1 apresenta todos os componentes deste instrumento. A Figura 2.2 mostra alguns componentes em madeira amazônica disponíveis para os ensaios desta pesquisa.

### 2.3.2 Importância do tampo

É importante notar que é impossível caracterizar completamente o desempenho de um instrumento como um violão apenas através da análise de um único componente, como o tampo. Embora seja um componente crucial na produção de um som rico e dinâmico, existem muitas outras condições e materiais que trabalham em conjunto para produzir a variedade e profundidade dos sons produzidos pelo violão.

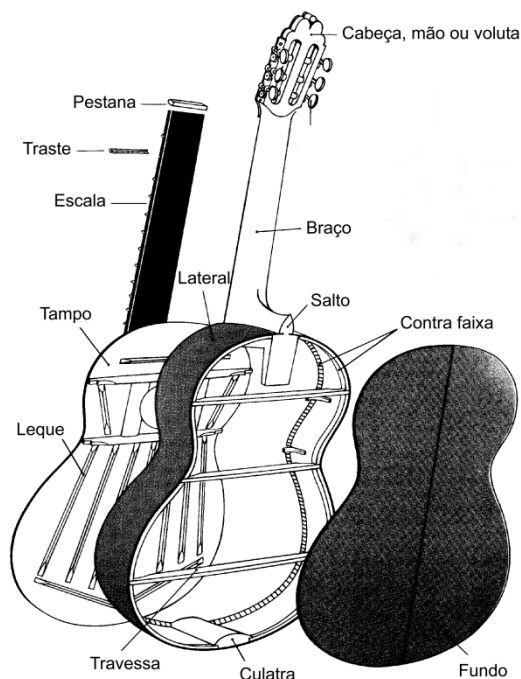


Figura 2.1 - Elementos do violão clássico (adaptada de [Wright, 1996]).



Figura 2.2 - Elementos do violão clássico fabricados de madeira amazônica (fotografia do autor).

Os materiais utilizados na fabricação do braço, cordas, ponte (cavelete), laterais e fundo, todos desempenham papéis importantes e juntos criam um efeito sinérgico que não pode ser completamente analisado em uma base de componente a componente. Embora reconhecendo essa complexidade, o tampo continua a ser um componente de importância crucial cujas propriedades individuais têm impacto mensurável sobre o desempenho global do violão.

Uma razão principal para que o tampo seja um componente crítico do violão é o fato das vibrações criadas em sua superfície ajudarem a amplificar e radiar as vibrações que são antes produzidas nas cordas, quando excitadas. Enquanto os materiais usados na ponte (cavelete) afetam a eficiência com que as vibrações são transferidas das cordas para o tampo, as propriedades físicas do tampo fornecem um conjunto de valores mensuráveis, possível de calcular e analisar, em um esforço para analisar o desempenho acústico de um material.

Os instrumentos raramente podem ser investigados através da aplicação de técnicas de medição destrutivas, por exemplo, o teste de tração para a determinação do módulo de elasticidade, o que limita os estudos aos poucos casos em que os instrumentos são acidentalmente destruídos.

Para os fabricantes industriais de instrumentos musicais, a reprodutibilidade na qualidade desempenha um papel importante. Uma vez que o processo de fabricação não pode reagir de forma especial para cada madeira que apresente particularidades, as diferentes propriedades do material não podem ser compensadas. Neste caso, o conhecimento da correlação entre as características do material mensuráveis e a qualidade

acústica serve como base para uma ferramenta de classificação. A avaliação dos parâmetros visuais, tais como a cor, e estrutura de anéis anuais de crescimento e as características como a densidade poderiam ser utilizadas para, de certa forma, imitar os métodos subjetivos dos fabricantes artesanais, mas não garantem a qualidade de forma absoluta.

As medições de amortecimento ou rigidez do material bruto ou do tampo ainda desmontado podem ser utilizadas como dados de entrada adicionais. Integrar as propriedades acústicas e mecânicas dos materiais na decisão para possíveis alterações na forma de construção pode substituir parcialmente o tratamento individual para cada madeira específica.

### **2.3.3 Barramento harmônico**

Também chamado de leque harmônico, ou no inglês *fan bracing* ou *sound bars*, esta estrutura possui basicamente duas funções. Primeiro, é responsável por reforçar a resistência mecânica do tampo, de forma a minimizar a distorção ao longo do tempo em função da tensão que as cordas exercem a partir da ponte (cavalete). Em segundo lugar, as modificações estruturais alteram as frequências naturais de vibração do tampo, o que influencia diretamente no som radiado. O desenho formado pelas barras subdivide o tampo em partes diferentes, o que proporciona uma melhoria da resposta para frequências específicas.

O braço, o fundo e as laterais, a escala, o tamanho da caixa de ressonância, o tipo de corda, e muitos outros elementos afetam o som do violão, em intensidade e timbre. Mas a intenção deste trabalho é focar na análise do tampo, pois é esta estrutura que tem o maior efeito sobre o resultado final do instrumento.

### **2.3.4 Projeto de leque harmônico adotado**

O projeto usado como referência em todos os tampos avaliados neste trabalho seguem o padrão de barramento conhecido como “Torres”, em referência a Antonio de Torres Jurado (1817-1892). Torres modificou radicalmente o projeto até então usado por seus antecessores, dando-lhe um corpo maior, barramento mais leve e um tampo mais fino [Romanillos 1990].

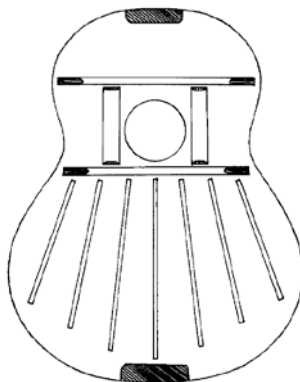


Figura 2.3 - Projeto de barramento harmônico básico.

O padrão de barramento mostrado na Figura 2.3, incluindo pequenas variações do mesmo, tem sido o mais amplamente utilizado em todo o mundo desde sua criação. Nos dias de hoje, é considerada uma configuração comum, mas há 150 anos era uma ideia revolucionária. As barras acompanham a direção longitudinal dos veios da madeira usada no tampo, e não perpendicular como era comum no alaúde e em muitos dos cordofones do início do século 19. O projeto de Torres apresentou uma maior faixa dinâmica de possibilidades tonais, e tornou-se uma ferramenta mais versátil para se fazer música.

### 2.3.5 Comportamento em diferentes regimes de frequência

O violão responde e radia de maneira diferente para diferentes frequências de excitação. A faixa de frequência das notas fundamentais capazes de serem tocadas em um violão, em afinação padrão, é de 82 Hz a 1050 Hz (Figura 2.5). Embora uma excitação fora desta faixa de frequências seja induzida através de harmônicos mais elevados das cordas ou pelo batimento entre elas, Ove Christensen [Christensen, 1983] mostrou que a maior parte da energia irradiada pelo violão clássico ocorre entre 200 Hz e 800 Hz. No entanto, considerando que o ouvido humano é mais sensível na faixa de 1000 Hz a 5000 Hz, a importância dos modos mais elevados não deve ser negligenciado. Por exemplo, é provável que a sensação auditiva descrita por músicos como "brilho" seja determinada em grande parte na faixa de frequências de 1 kHz a 3 kHz (Jansson, 2002). É importante ressaltar que os intervalos de

frequência dados são valores aproximados e dependem do instrumento particular a ser estudado.

Em frequências muito baixas ( $\approx 0$  Hz a 90 Hz), modos de vibração envolvem a curvatura do violão inteiro, incluindo o braço. Em baixas frequências ( $\approx 90$  Hz a 250 Hz), o movimento do corpo do instrumento é importante, e é onde ocorre a maior interação com o tampo e do movimento tipo ressoador de Helmholtz atribuído à cavidade interna de ar. Frequências médias ( $\approx 200$  Hz a 600 Hz) envolvem grande movimento do tampo e, conseqüentemente, este é o ponto em que a maioria dos estudos sobre o violão acaba utilizando a técnica de padrões de Chladni<sup>4</sup>. Algumas ressonâncias nessa frequência devem-se ao acoplamento entre ressonâncias fundamentais do tampo e os modos superiores da cavidade de ar interna [Jansson, 1977]. Frequências mais altas ( $\approx 600$  Hz a 1200 Hz) correspondem a um movimento bastante localizado do tampo. Altas frequências ( $\approx 1200$  Hz a 10.000 Hz) envolvem movimentos um pouco mais complexos provenientes da interação entre o tampo, a ponte (cavelete) e outros elementos. A Figura 2.4 ilustra os elementos envolvidos em cada faixa de frequência.

---

<sup>4</sup> Se uma placa é colocada para vibrar continuamente a uma frequência coincidente com um modo vibratório, o posicionamento espacial de máximos e mínimos de vibração se torna independente do tempo. Devido à geometria bidimensional da placa, os nós formam linhas em vez de pontos. Caso um material particularmente fino seja distribuído uniformemente sobre a superfície superior da placa, as partículas tendem a repousar nas posições nodais, formando desenhos (padrões). Devido à simplicidade do método de padrões Chladni, este tem sido ainda bastante usado por *luthiers* na determinação das propriedades do tampo do instrumento, durante e após a construção. No entanto, há uma grande demanda de um grupo de *luthiers* para fazer medições mais quantitativas de seus instrumentos. Isto tem sido difícil porque não existe ainda uma medida amplamente aceita nessa área, pelo menos, não tanto quanto as Figuras Chladni. Dessa forma, para que qualquer nova técnica seja aceita, deve-se relacioná-la com o método Chladni tradicional [Rossing, 2011].



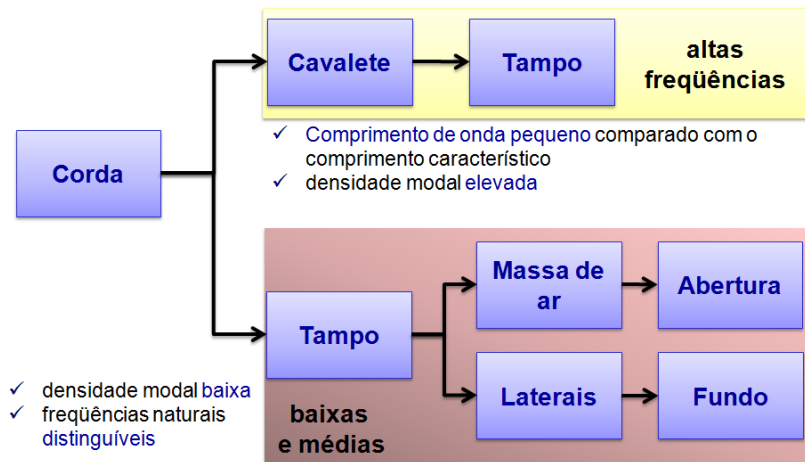


Figura 2.4 - Elementos do violão relacionados às diferentes faixas de frequência (adaptada de [Rossing, 2011]).

### 2.3.6 Resposta em frequência de violões

Os espectros do som do violão obtidos por vários pesquisadores, incluindo Richardson (1982), Meyer (1983), Jansson (1983), Ross e Rossing (1979) e Ross (1979) mostraram diferenças individuais, mas todos apresentam fortes picos próximos de 100 Hz e 200 Hz, vários picos na região entre 400 Hz e 700 Hz, e um grande conjunto de picos acima de 1 kHz.

Estes espectros mostram o nível do som radiado, quando uma força senoidal de amplitude constante é aplicada perpendicularmente ao cavalete. Os picos fortes em torno de 100 Hz, 200 Hz e 400 Hz, que resultam de ressonâncias do corpo do instrumento, determinam as características de baixa frequência do violão. Meyer (1983) afirma que o nível de pico da ressonância perto de 400 Hz correlaciona-se muito bem com a classificação de qualidade do violão por ouvintes e musicistas. Veja a Figura. 2.5.

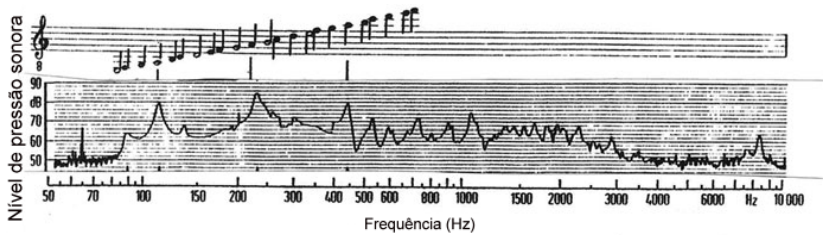


Figura 2.5 - Espectro sonoro de violão clássico para uma força senoidal aplicada perpendicularmente ao cavalete (adaptado de [Meyer, 1983]).

A Figura 2.6 representa a escala do violão, incluindo todas as possíveis notas fundamentais de sua extensão.

As letras A, B, C, D, E, F e G são utilizadas para as alturas musicais lá, si, dó, ré, mi, fá e sol, respectivamente. Os países de língua inglesa utilizam os sinais # (em inglês: *sharp*, “sustenido”) e *b* (em inglês: *flat*, “bemol”) para representar as alterações cromáticas dessas notas. Para a Figura 2.6 considera-se também que a numeração de cada coluna representa as chamadas “casas” da escala do instrumento.

E  
329

Nome da nota  
Frequência [Hz]

Casa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C
329	349	370	392	415	440	466	494	523	554	587	622	659	698	740	784	831	880	932	988	1047
B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G
247	262	277	294	311	329	349	370	392	415	440	466	494	523	554	587	622	659	698	740	784
G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#
196	208	220	233	247	262	277	294	311	329	349	370	392	415	440	466	494	523	554	587	622
D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#
147	156	165	175	185	196	208	220	233	247	262	277	294	311	329	349	370	392	415	440	466
A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F
110	117	123	131	139	147	156	165	175	185	196	208	220	233	247	262	277	294	311	329	349
E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C
82	87	92	98	104	110	117	123	131	139	147	156	165	175	185	196	208	220	233	247	262

Figura 2.6 - Escala do violão com as respectivas notas e frequências associadas

2.3.7 Modos de vibração do tampo montado

Como já mencionado, na maioria dos instrumentos de corda, a corda vibrante transfere sua energia vibracional para o tampo, que radia o som de forma muito mais eficiente do que a corda em si. O

comportamento de vibração desse tipo de estrutura muitas vezes pode ser descrita em termos de modos normais de vibração. Assim, pode-se dizer que um aspecto fundamental da ciência de instrumentos de corda é a análise dos modos normais de vibração de placas. Na literatura, nota-se uma carência em estudos do tampo ainda na fase de construção, ou seja, sem estar montado na caixa acústica. No caso do violão clássico, os modos de baixa frequência de um tampo montado na caixa acústica podem ser relacionados da seguinte forma [Caldersmith, 1995]:

O modo fundamental (1,1), representado na Figura 2.7, acopla com pistão de ar que se forma na cavidade da boca, gerando uma ressonância dupla: uma mais baixa, em que o pistão de ar se move em antifase ao movimento fundamental do tampo e com alta amplitude, dominando o fluxo de volume; e outra mais alta, em que o pistão de ar e o tampo se deslocam em fase, maximizando o fluxo de volume. A física deste comportamento explica muito do caráter da resposta em baixas frequências do violão.

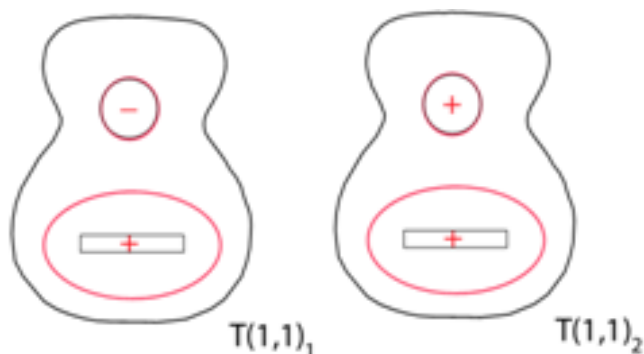


Figura 2.7 - Modo (1,1) do tampo montado.

O modo dipolar transversal (2,1), ilustrado na Figura 2.8, é um radiador ineficiente, formado por ventres adjacentes em fases opostas, que eliminam fluxo de velocidade de volume. Este fenômeno ocorre porque as cordas centrais (D e G) excitam tampo na linha nodal e se acoplam a ele com pouca energia. Já as cordas mais externas, E grave e E aguda, próximas do máximo do antinó, se acoplam de forma mais eficiente. Este modo ocorre em frequências abaixo da fundamental da primeira corda (330 Hz). Algumas notas sobre a segunda corda (B) tem parciais que se decompõem rapidamente, ocasionando em pouca saída de som, porque transferem bastante energia para este modo.

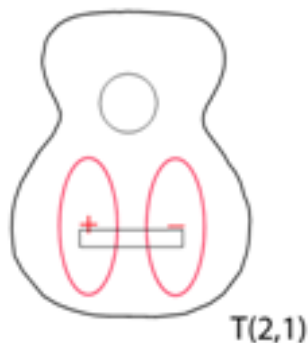


Figura 2.8 - Modo (2,1) do tampo montado.

O dipolo longitudinal (1,2) é um ótimo gerador de velocidade de volume, em que a zona frontal antinodal vibra com uma maior amplitude e uma maior área do que a zona traseira antinodal. As cordas acoplam fracamente com este modo, pois a linha nodal corre quase pela posição do cavalete onde os modos são excitados pelas cordas.



Figura 2.9 - Modo (1,2) do tampo montado.

O modo tripolar transversal (3,1), ilustrado na Figura 2.10, consegue ser excitado por todas as cordas e representa uma fonte de velocidade de volume eficiente, em que dois ventres exteriores vibram com maior amplitude do que o antinó central e, ainda, vibra na mesma fase da velocidade de volume.

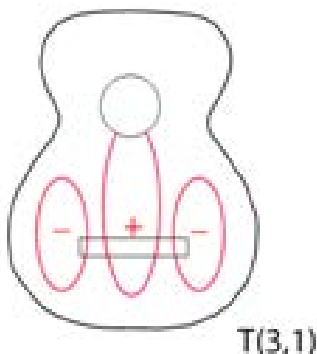


Figura 2.10 - Modo (3,1) do tampo montado.

De fato, o som de baixa frequência produzido por um violão clássico é essencialmente devido a dois modos: o acoplamento dos modos (1,1) do tampo e do fundo, em cooperação com o modo (3,1) do tampo, com algumas perturbações devido a uma fraca excitação dos modos dipolo (2,1) e (1,2).

A eficiência de radiação destes modos mais elevados aumenta à medida que as dimensões de suas zonas antinodais se aproximam do comprimento de onda no ar com a frequência crescente. A relação entre a amplitude do ponto de acionamento e o som radiado demonstra este efeito.

Quanto mais rígido o cavalete em relação ao tampo, mais se reduzem os níveis de excitação dos modos mais elevados. Quanto mais rígido o cavalete, mais "nodal" este se torna para modos mais elevados. O ajuste do cavalete para os níveis de excitação apropriados é uma das habilidades de um construtor de violões experiente [Caldersmith, 1995].

## 2.4 A madeira

Serão apresentados nesta seção, de forma bastante resumida (Gonzaga, 2006), alguns conceitos básicos sobre o material estudado, a madeira, para que se construa um campo lexical, dentro da área de conhecimento explorada.

A madeira é um material orgânico, composto basicamente por carbono; heterogêneo, possuindo vários tipos de células como componentes e diferente distribuição deles; poroso, pois tem espaços vazios em função da distribuição dos arranjos e componentes; higroscópico, pela sua capacidade de absorver, perder e reter água;

anisotrópico, apresentando comportamento diferente nos eixos anatômicos, o que é muito importante no seu processamento e uso.

As abordagens de pesquisa relacionadas a este material podem ser separadas resumidamente em fisiologia (estuda como funciona), morfologia (estuda a forma), anatomia (estrutura interna), classificação (sistemática, taxonomia, atribui nomes e classifica as plantas), citologia (estrutura das células, função e história), genética (hereditariedade e variabilidade DNA e RNA), biologia celular (funções da célula e sua importância), ecologia (relação entre organismos e seu ambiente) e paleobotânica (biologia e a evolução das plantas fósseis). Neste trabalho, serão utilizados conceitos principalmente da fisiologia, anatomia e classificação, aplicados à seleção de materiais para a engenharia mecânica.

### **2.4.1 Nomenclatura**

A nomenclatura é feita em função das características da árvore, folhas, casca, flores ou inflorescências, também como homenagem a grandes personalidades.

De maneira geral, uma árvore é identificada com nome popular, nome científico (sem levar acento), sistema binomial, gênero, espécie, nome do autor, grafia (em itálico), gênero (em maiúsculo), espécie (em minúsculo) e autor. Além disso, ainda pode apresentar mais identificadores, como "Spp" - grupo (não em itálico), "Sp" - espécie, "Sobre autor" - o primeiro citado foi quem descobriu, o segundo citado foi quem complementou o estudo.

### **2.4.2 Anatomia**

A anatomia é responsável por identificar o material, fazer a distinção das espécies, prever propriedades e utilização, avaliar seu comportamento tecnológico.

A estrutura macroscópica do tronco apresenta anéis descontínuos (Figura 2.11), fornecendo informações como a idade aproximada, características do desenvolvimento em relação ao tempo, desbastes, poda, entre outros.

A Figura 2.11 ilustra o corte de um tronco, mostrando o cerne (no interior), o alburno (parte mais clara) e a medula (ponto escuro no centro). As pequenas linhas radiais são os nós.



Figura 2.11 - Corte transversal de um tronco.

O cerne é a parte interna do tronco, onde as células sofreram transformações físicas e químicas. Na madeira serrada, a parte externa (alburno) é descartada, geralmente sendo aproveitado o cerne. A proporção entre essas partes, interna e externa, é variável em função da espécie, sendo o cerne normalmente mais escuro. Porém, isto depende da espécie e da idade do vegetal; a cor não deve ser levada em conta para identificação da madeira. O cerne também possui maior densidade, maior resistência natural (física e mecânica com células mais densas e mais compostas) e está localizado na região central da árvore. Possui tecido frágil (células parenquimáticas do início do desenvolvimento da árvore, que são mais frágeis) [Burger e Richter, 1991].

O alburno ou brancal (termo usado industrialmente) é mais leve, possui menor resistência natural e menor resistência mecânica, principalmente por conter mais água do que o cerne.

Os raios são onde se encontram as células de armazenamento (parênquima) e condução horizontal de seiva. Se um tronco racha no raio, deve-se cuidar na secagem, por ser a única célula que está em sentido contrário. Quanto maior o raio, mais cuidadoso deve ser o processo de secagem. Os raios variam em altura e largura e têm grande influência no processo de secagem, por razões de empenamento. Existem algumas opções de corte em relação ao raio (Figura 2.12).

Observados a partir de três planos distintos, os raios são um agregado de células parenquimatosas dispostas no sentido radial em relação ao eixo da árvore. No topo da madeira, aparecem como numerosas linhas retilíneas, aproximadas, geralmente mais claras.

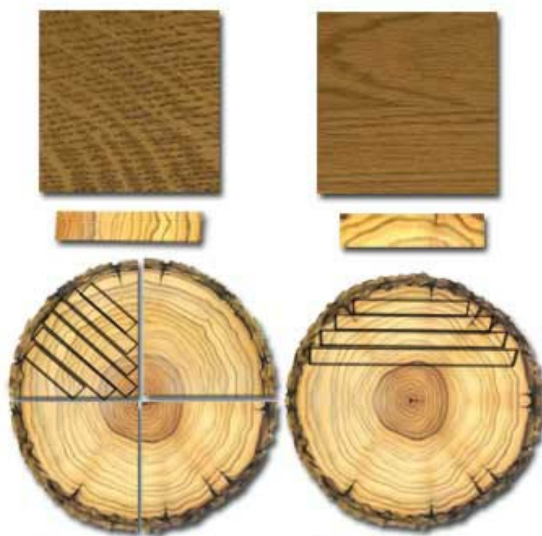


Figura 2.12 - Diferentes formas de serragem da madeira: radial e tangencial.

### 2.4.3 Figura

É o termo usado para descrever a aparência natural das faces da madeira que a torna facilmente distinta das demais. Cada desenho depende do plano de corte (radial ou tangencial) e resulta de várias características macroscópicas: cerne, alburno, cor, grã (ver 2.4.5), e principalmente de dois elementos estruturais - anéis de crescimento e raios.

### 2.4.4 Textura

É a característica resultante do tamanho e uniformidade das dimensões das células (poros). A textura pode ser grossa, média ou fina. Geralmente as madeiras que apresentam textura grossa possuem poros grandes, visíveis a olho nu, com diâmetro tangencial maior que 300  $\mu\text{m}$  e não recebem bom acabamento. As madeiras de textura média apresentam poros com diâmetro tangencial de 100  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$ . As de textura fina apresentam em geral poros de pequenas dimensões, uniformemente distribuídos, com diâmetro tangencial menor que 100



µm. Ao contrário de muitas madeiras européias e norte-americanas, a maioria das madeiras amazônicas apresenta textura uniforme.

#### **2.4.5 Grã**

Característica relacionada às direções gerais das fibras e outros elementos da madeira. Quando as células são paralelas ao crescimento vertical, a grã é direita ou regular. Quando a grã apresenta desvios ou inclinações em relação ao eixo principal do tronco, a grã é chamada irregular, podendo ser oblíqua ou ainda entrecruzada. Preferencialmente, as madeiras utilizadas na confecção de instrumentos musicais devem apresentar grã direita, no entanto muitas espécies tropicais apresentam grã cruzada ou entrecruzada.

#### **2.4.6 Teor de umidade inicial**

É uma propriedade de suma importância, tendo em vista que o período de secagem é influenciado por este fator. No entanto, um alto teor de umidade inicial está diretamente relacionado com a densidade da madeira, ou seja, o teor de umidade inicial diminui com o aumento do peso específico.

Por conseguinte, madeiras tropicais que apresentam baixa densidade e, portanto, alto teor de umidade inicial, são geralmente fáceis de secar, sem apresentar defeitos graves.

#### **2.4.7 Trabalhabilidade**

O grau de facilidade de se trabalhar a madeira é denominado trabalhabilidade. A grã da madeira poder fornecer uma ideia da facilidade de se conseguir um bom acabamento, sendo que uma madeira com grã reta provavelmente apresentará uma dificuldade menor de se trabalhar do que as madeiras de grã irregulares.

Pelo fato da madeira ser um material de origem biológica, está sujeita a variações na sua estrutura que podem acarretar mudanças nas suas propriedades. Estas mudanças são resultantes de três fatores principais: anatômicos, ambientais e de utilização.

Um requisito básico para se determinar se uma espécie de madeira é adequada para um uso determinado, é o conhecimento e a análise de suas propriedades durante a usinagem. Estas características incluem serramento, torneamento, lixamento e furação. Algumas dessas

operações podem ser encontradas no processamento primário e outras principalmente no processamento secundário da madeira.

#### **2.4.8 Coníferas e folhosas (*Hardwood e Softwood*)**

A tradução ao pé da letra das palavras *softwood* e *hardwood* para madeira macia e madeira dura, respectivamente, pode ser incorreta. É preciso tomar cuidado para não generalizar os grupos de vegetais.

*Softwood* faz referência ao grupo de árvores coníferas, mas nem todas as madeiras provenientes dessas plantas são macias. O mesmo ocorre com o termo *hardwood*, que se refere ao grupo de árvores folhosas, porém nem todas fornecem madeiras duras.

Para explicar o que é uma conífera e uma folhosa, cabe começar pela classificação botânica das árvores que abrange as Fanerogamas e que, por sua vez, se subdividem em Gimnospermas e Angiospermas. No grupo das Gimnospermas encontram-se as coníferas, como o pinheiro-do-paraná, o pinus, entre outros. Árvores cujas folhas têm formato de agulha ou escamas são consideradas primitivas, pois não possuem um sistema eficiente de condução de água, da raiz ao resto da árvore. Provenientes do hemisfério norte, a maior parte das coníferas estão habituadas ao clima frio e foram trazidas ao Brasil para cultivo. Entre elas estão os seres vivos mais antigos do nosso planeta. São árvores como a sequóia, que sobrevivem há milênios. E no grupo das Angiospermas, encontra-se a maior parte das árvores brasileiras, as folhosas, plantas consideradas mais evoluídas em função do trabalho que suas células desempenham para levar água do solo ao resto da árvore. Nessa categoria estão: andiroba, jatobá, mogno, ipê e cedro.

#### **2.4.9 A madeira como material de engenharia**

Como já visto, a madeira não é um material homogêneo, mas sim formado por diversos elementos cuja forma, tamanho, número e disposição, variam muito de espécie para espécie.

Até o início do século 20, a utilização das madeiras tropicais quase se limitava ao comércio de espécies preciosas, como a teca, o sândalo e certos mognos, mas o aumento do consumo mundial de madeiras contribuiu para uma intensificação da exploração das florestas tropicais.

A enorme diversidade de madeiras levou à necessidade de aprofundar os estudos anatômicos. Nas madeiras tropicais surgem, com

muita frequência, dúvidas quanto às suas origens, pois, por vezes, são comercializadas com nomes regionais diferentes e são frequentes os casos de utilização de diferentes nomes para a mesma espécie, assim como o mesmo nome para espécies sem nenhuma afinidade. Este problema é muitas vezes de difícil resolução e o estudo anatômico torna-se fundamental para a identificação das madeiras. Atualmente, torna-se mais fácil a identificação das madeiras através da utilização de bases de dados, onde estão presentes determinadas características importantes com valor de diagnóstico. Porém, mesmo as bases de dados mais importantes [IBAMA/LPF] e dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e do Instituto de Pesquisas da Amazônia (INPA) ainda não contemplam características mecânicas para muitas espécies nativas da Amazônia.

A combinação única e desejável de propriedades físicas e mecânicas da madeira só é encontrada em casos excepcionais quando se considera o uso de materiais sintéticos. Isso fez da madeira o material escolhido para uma infinidade de aplicações que vão desde a construção de equipamentos esportivos a instrumentos musicais, já há muito tempo. Considera-se um material vantajoso também pela sua abundância e por ser relativamente fácil de moldar com ferramentas simples. Uma característica que a diferencia da maioria dos materiais sintéticos é ser um material ortotrópico, o que significa apresentar propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos perpendiculares entre si: longitudinal, radial e tangencial. O eixo longitudinal (L) é definido como paralelo à fibra (granulação), assim, ao longo do comprimento de um tronco de árvore; o eixo radial (R) é perpendicular aos anéis de crescimento, e o eixo tangencial (T) é perpendicular à grã, mas tangente aos anéis de crescimento.

A madeira é um composto hierarquicamente estruturado. As paredes celulares consistem de microfibrilas de celulose embebidas numa matriz de lignina e hemicelulose, em que pequenas quantidades (5 a 10%) de outros extrativos (por exemplo, óleos) estão contidos [Wood Handbook, 2010; Dinwoodie, 2000]. Variações no volume e química desses ingredientes, combinados com diferenças na quantidade e distribuição de porosidade, determinam a estrutura e, assim, a densidade e propriedades mecânicas de uma madeira. Enquanto as propriedades de uma espécie única de madeira são constantes dentro de certos limites, a gama de propriedades entre as espécies pode ser variada. Em todo o mundo, a densidade da madeira varia de cerca de  $100 \text{ kg/m}^3$  para a balsa (*Ochroma pyramidale*) a cerca de  $1.400 \text{ kg/m}^3$  para o pau-santo (*Guaicum officinale*) e o pau-cobra (*Brosimum guianense*), um valor

próximo ao encontrado em polímeros com fibra de carbono reforçado<sup>5</sup> (CFRP). No entanto, mesmo na Europa, que tem uma pequena diversidade de espécies de árvores, a densidade varia de cerca de 400 kg/m<sup>3</sup> para o salgueiro (*Salix alba*) até cerca de 800 kg/m<sup>3</sup> para a carpa (*Carpinus betulus*) e 950 kg/m<sup>3</sup> para o buxo (*Buxus sempervirens*). Entre as amazônicas, a densidade varia de aproximadamente 380 kg/m<sup>3</sup> para o marupá (*Simarouba amara*) até cerca de 1250 kg/m<sup>3</sup>, no caso do pau-brasil (*Caesalpinia echinata* L.)

## 2.5 Madeira ressonante

Entre as muitas espécies de madeira diferentes usadas na fabricação de instrumentos musicais, o termo “madeira ressonante” geralmente se refere ao material usado para a fabricação do tampo superior de caixas de ressonância em instrumentos de cordas. Segundo Bremaud [Bremaud, 2012], as propriedades do material usado especificamente no tampo desempenham um papel determinante no comportamento acústico de um instrumento.

Algumas características das “madeiras ressonantes” são bastante conhecidas na literatura (densidade, módulo dinâmico específico de elasticidade e amortecimento viscoelástico ao longo da granulação) [Haines (1979), Yano et al.(1997), Sadie e Tyrell (2001), Bucur (2006)], enquanto outras não são ainda totalmente caracterizadas (anisotropia e dependência dos parâmetros com a frequência).

As interações com higrometria ou possíveis tratamentos (biológicos, químicos, térmicos ou mesmo o envelhecimento) também têm sido objeto de investigação. Finalmente, a definição essencial de "madeira ressonante" é o fato de ser selecionada pelo fabricante e efetivamente utilizada para a construção do tampo de um instrumento.

No entanto, este assunto não tem sido explorado o suficiente. Exige uma abordagem interdisciplinar capaz de conectar os critérios empíricos de avaliação utilizados pelos construtores de instrumentos, com a análise mecânica estrutural da madeira e, finalmente, os estudos de percepção da psicoacústica.

---

<sup>5</sup> Trata-se de um polímero reforçado muito forte e leve que contém fibras de carbono. O polímero mais usado é a resina epoxídica, mas outros, tais como poliéster, vinil ou nylon, são também utilizados. O compósito pode conter outras fibras, tais como o Kevlar, alumínio, ou fibras de vidro, bem como fibras de carbono.

### 2.5.1 Madeiras para tampo (Cordofones)

O som que uma corda dedilhada ou friccionada produz é quase inaudível, porque possui baixa eficiência de radiação sonora.

Para produzir sons com intensidade suficiente para nossos ouvidos, a corda deve ser associada a um ressoador, que apresenta um melhor acoplamento com o ar para transmitir a energia vibratória da corda e irradiar som. No violão, a ponte (ou cavalete) transmite as vibrações das cordas para o tampo, que é conectado à placa traseira pelas laterais. A forma e o material do corpo influenciam fortemente a qualidade do som e a forma em que é radiado para a sala. A abertura em forma arredondada no tampo não têm apenas uma influência direta sobre as vibrações deste, mas também fornece uma passagem através do qual o ar contido no corpo do instrumento transmite suas oscilações para o exterior.

Um olhar mais atento não só nos furos no tampo de instrumentos de corda, mas também na sua forma geral, revela uma característica comum a quase todos os instrumentos musicais de madeira: tanto o instrumento em si como os furos são arredondados. Tal projeto não é apenas um capricho estético, mas se deve também à natureza ortotrópica da madeira. As madeiras leves comumente usadas em tampos, como o abeto, costumam ser cortadas em paralelo à grã, particularmente quando têm a forma de uma placa de modesta espessura de 2 mm a 3 mm, como é típico para violino e violão. Cortando-a em curvas e círculos, o fabricante de instrumentos evita as concentrações de tensão associadas aos cantos vivos.

Uma premissa comum entre músicos e construtores é que o uso constante do instrumento pelo músico e o envelhecimento da madeira melhoram as propriedades acústicas de instrumentos musicais, e que os instrumentos que são exibidos em museus, sem ser tocados, perdem sua qualidade. Diz-se também que "violinos antigos soam mais doce" e que os novos precisam ser "amaciados". A umidade e a fluência das vibrações parecem ter um papel importante neste processo.

Hunt e Balsan (1996) mostram experimentalmente que tocar regularmente em umidade intermediária ou alta leva a um aumento na rigidez e diminuição do fator de perda.

Beavitt (1996) e Segerman (1996, 2001) apresentam evidências experimentais para sustentar a hipótese de que o uso regular do instrumento sob ciclos de umidade resultam em mudanças no espectro harmônico, tornando-o mais sonoro e ressonante.

Outra pesquisa mostra que a decomposição gradual e perda de hemicelulose com o tempo diminui a densidade de uma madeira sem afetar o seu módulo de Young [Bucur, 2006]. Este caminho está sendo aprofundado em pesquisas para o “envelhecimento” da madeira do tampo, infectando-o com um fungo cuidadosamente selecionado para reduzir a densidade, mantendo o módulo de Young constante e, assim, melhorando o coeficiente de radiação e a qualidade sonora [Zierl, 2005].

Pesquisas mais aprofundadas sobre o amadurecimento de instrumentos musicais são necessárias para explicar de forma conclusiva os vários fenômenos observados em termos de química, estrutura e propriedades mecânicas da madeira e do ambiente a que está exposta.

### **2.5.2 Madeiras tradicionais**

Dentre as centenas de espécies florestais bem conhecidas no mundo, apenas poucas são efetivamente utilizadas para instrumentos musicais. Isto se deve basicamente a dois fatores: forte tradicionalismo, que sempre evitou qualquer iniciativa científica nesta área e, principalmente, às excelentes propriedades físicas e mecânicas das madeiras já utilizadas para fabricação de instrumentos musicais [Souza, 1982].

Por causa desse forte tradicionalismo criado no setor, muitos dos instrumentos fabricados no Brasil, que possui uma das mais ricas diversidades florestais do planeta, são feitos com madeiras importadas. As madeiras de maior preferência para a confecção de violões clássicos são o abeto das florestas da Suíça e da Alemanha, e o abeto "Sitka" da América do Norte, para o tampo. Nos braços, as preferências são o maple, mogno, cedro e walnut; enquanto as escalas são feitas, geralmente, em maple, jacarandá indiano (rosewood) e pau-marfim (em alguns instrumentos nacionais).

O abeto (*Picea abies*) tem atraído desde há muito tempo a atenção de muitos pesquisadores em acústica musical e mecânica estrutural da madeira, resultando no mais completo banco de dados de propriedades mecânicas / acústicas para uma única espécie. Isto o tornou uma referência interessante para a compreensão do comportamento acústico da madeira. Além disso, o estudo de madeiras apropriadas para fabricação de instrumentos envolve interações entre diversas áreas de conhecimento, e a riqueza cultural proporcionada pelo volume de informações já existentes sobre o abeto é um excelente modelo para a exemplificação do conceito de madeira ressonante.

Segundo a literatura [Buksnowitz et al, 2007], o abeto apresenta baixa densidade ( $\approx 430 \text{ kg/m}^3$ , em média) e amortecimento ( $\eta = 6,9 \cdot 10^{-3}$ , em média), ao passo que possui valores muito altos de módulo de elasticidade (até 12 GPa, levando a velocidades do som de cerca de 6000 m/s). Outras madeiras com módulo de elasticidade tão alta são na sua maioria outras espécies de *picea*, ou algumas madeiras tropicais raras com densidades muito altas.

Como resultado, sobretudo do baixo amortecimento, a capacidade de radiação sonora de uma placa de madeira feita de abeto é mais alta do que no caso da maioria das outras madeiras. No entanto, as espécies mais leves apresentam radiação sonora ainda maior (algumas folhosas leves usadas em alguns instrumentos, ou mesmo a balsa).

Outras espécies de *picea*, incluindo *Sitka* que também é usada para tampos, têm propriedades muito próximas ao abeto da Noruega. Madeiras utilizadas em cordofones fabricados fora do eixo comercial europeu são bastante diferentes.

O cedro vermelho ocidental (*Thuja plicata*), do inglês, *western redcedar* (que é na verdade um cipreste, em vez de um cedro, apesar da sua taxonomia) é uma madeira de baixa densidade e com amortecimento muito baixo, enquanto seu módulo de Young é citado na literatura mais tipicamente na ordem de 6,0 GPa. Trata-se de uma madeira adequada para tampos, apesar de sua resistência e rigidez relativamente baixas, e este é realmente o seu diferencial. Se substituída na mesma espessura em um tampo de abeto, irá provavelmente soar bem diferente. Isso tem dado ao cedro uma reputação como sendo de tonalidade “escura” ou “quente”, principalmente por resultar em um modo de ressonância (1,1) do tampo em frequências mais baixas. Se a espessura é aumentada para compensar, no entanto, este pode produzir um som comparável ao do abeto.

Uma distinção que se encontra muito frequentemente sobre o cedro em relação ao abeto é a de que um tampo fabricado em cedro apresenta um som com mais projeção do que outro semelhante feito de abeto de mesma idade de fabricação [SOMOGYI, 2010]. Violões feitos de abeto normalmente levam vários anos para que seu som se desenvolva plenamente. Ainda não está muito claro por que isto ocorre, no entanto, há especulações de que seja em função da diferença de anisotropia entre estas espécies.

### 2.5.3 Madeiras alternativas da Amazônia

Dentre as centenas de espécies já catalogadas, apenas cerca de vinte são amplamente utilizadas, sendo que algumas destas já se encontram ameaçadas de extinção. Seria muito pouco provável que dentre todas as espécies tropicais disponíveis não houvesse pelo menos algumas com potencial para substituir as classicamente utilizadas, garantindo as excelentes propriedades físicas, mecânicas e acústicas desejadas. Enquanto isso, a procura de madeira brasileira para a manufatura de instrumentos musicais tem crescido consideravelmente em função do aumento nos preços da madeira importada, e da demanda interna cada vez maior por instrumentos. Além disso, o grande diferencial da madeira sustentável é ter sido extraída seguindo meios éticos certificados pelo Conselho de Manejo Florestal, evitando a erosão e preservando o ecossistema.

São muitas as espécies de madeiras da Amazônia que saem do país e quase sempre voltam, importadas, como produto final (pianos, violões, violinos, etc.). Os exemplos mais clássicos são o pau-Brasil, amplamente utilizado para arcos de violino, e o jacarandá-da-Bahia, para instrumentos de corda, como o violão, que foram reflorestados exclusivamente para exportação com tal finalidade, mas mesmo assim ainda estão ameaçados de extinção.



Figura 2.13 - Caminhão com mogno, 1978. Créditos da foto: Marcos Santilli

Foram selecionadas quatro espécies para testes acústicos iniciais. Estas são apresentadas na Tabela 2.1:



Tabela 2.1- Características anatómicas das espécies amazônicas pré-selecionadas.

<b>Coração de Negro</b> ( <i>Swartzia laxiflora</i> )		
	Cor	Preto (acromático)
	Figura	Listras fracas (anéis de crescimento)
	Textura	Fina
	Grã	Direita a irregular
<b>Marupá</b> ( <i>Simarouba amara</i> )		
	Cor	Amarelo amarronzado acinzentado - muito claro
	Figura	Ausente
	Textura	Média
	Grã	Direita
<b>Tauari Vermelho</b> ( <i>Cariniana micrantha</i> )		
	Cor	Marrom avermelhado - claro
	Figura	Linhas longitudinais destacadas (anéis de crescimento)
	Textura	Média
	Grã	Direita
<b>Breu Branco</b> ( <i>Protinum sp</i> )		
	Cor	Marrom - claro
	Figura	Linhas longitudinais pouco destacadas (anéis de crescimento)
	Textura	Média
	Grã	Cruzada irregular

Quando esboça-se em um gráfico as várias propriedades físicas e mecânicas descritas na revisão bibliográfica, umas contra as outras, para as madeiras comumente utilizadas em diferentes tipos de instrumentos, pode-se ilustrar os requisitos de projeto para estes instrumentos e analisar por que certas espécies são mais adequadas para aplicações sonoras particulares e, portanto, tradicionalmente escolhidas por fabricantes de instrumentos musicais.

Os materiais são representados por bolhas e agrupados por cores, que indicam o uso tradicional para um material. A Figura 2.14 mostra o módulo de Young,  $E$ , contra a densidade,  $\rho$ , considerando a direção paralela à grã. Nela, lê-se que tampos são feitos de madeiras de baixa densidade, com um módulo de Young relativamente alto. As razões para tais escolhas são descritas no Item 2.5.

Com base nos dados resultantes do projeto "Avaliação das Espécies Madeireiras da Amazônia Seleccionadas para a Manufatura de Instrumentos Musicais", de 1989, foram obtidos dados iniciais de propriedades para algumas espécies amazônicas [LPF, 1989]. Relacionando-se as propriedades mecânicas como densidade, módulo de Young e velocidade de propagação do som, fica possível estipular faixas de uso de espécies por aplicações específicas no instrumento.

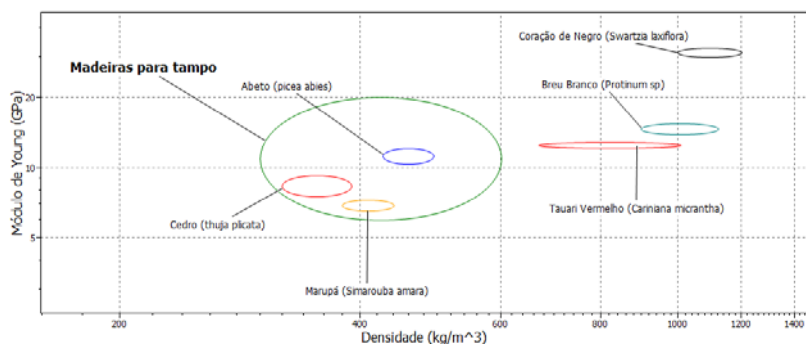


Figura 2.14 - Correlação entre o módulo de Young versus densidade da madeira.

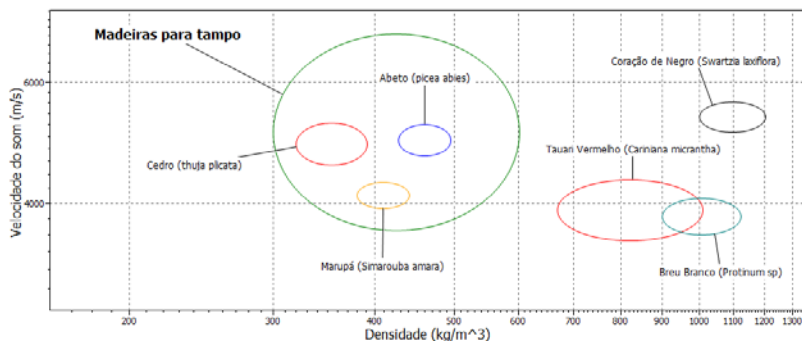


Figura 2.15 - Gráfico comparativo de propriedades para madeiras, traçando a velocidade do som,  $c$ , contra a densidade,  $\rho$ .

Como se pode observar nas Figuras 2.14 e 2.15, das quatro espécies pesquisadas para uso inicial em instrumentos musicais de corda, apenas o Marupá apresenta propriedades na faixa de valores indicada para uso na fabricação de tampos, que é o foco deste trabalho. As outras espécies apresentam características que justificam o uso em outros elementos do violão, como o braço, cavalete, fundo e laterais.

## 2.6 O Luthier

A palavra *luthier*, escrita desta forma, tem origem na língua francesa, de *luth*, que significa alaúde e era designada ao artesão que fabricava ou reparava tal instrumento de corda. Originário da Pérsia, introduzido na Península Ibérica pelos árabes, o alaúde era chamado de *ud*, possivelmente em função da expressão árabe *al'ud*, que significa “a madeira”. Hoje em dia, o termo *luthier*, também conhecido como luteiro, foi generalizado, sendo aplicado de forma mais abrangente a designar um profissional especializado na construção e reparo de instrumentos musicais de corda (violão, viola, violino etc.), instrumentos de sopro com chaves ou válvulas (clarineta, trompete, saxofone, tuba etc.) ou instrumentos de percussão (tambor, pandeiro, bateria etc.).

Antigamente, o ofício da luteria no Brasil era uma tradição quase restrita às famílias de imigrantes europeus que se estabeleceram no Sul e no Sudeste, que montaram fábricas de instrumentos. Com a competição internacional, que introduziu no mercado produtos mais baratos, a atividade estava quase extinta.

Felizmente, cada vez mais, a partir de iniciativas de profissionais liberais, o ofício tem ganhado espaço novamente e reconhecimento no mercado nacional e internacional, oferecendo concorrência aos países onde essa profissão já existe há muito tempo.

A luteria foi oficialmente inserida na Classificação Brasileira de Ocupações (CBO 2002 – 7421) em uma iniciativa tomada pelo SENAC-SP e pelo Ministério do Trabalho e Emprego, porém ainda não foi regulamentada pelo Congresso Nacional.

Existem cursos particulares de luteria como o do Conservatório de Tatuí, no estado de São Paulo, onde também a Fundação Tide Setubal oferece o curso de forma gratuita para quem tem o interesse nessa área. O curso de construção de instrumentos de cordas tem seu foco no violão. Foi implantado também na Universidade Federal do Paraná o curso superior de luteria. E em Manaus, a Oficina Escola de Luteria do Amazonas (OELA) desenvolve ações voltadas para a educação profissionalizante de jovens, também nesta área.

Nesse contexto, a importância de pesquisas que forneçam alternativas para a matéria-prima dos instrumentos fica ainda mais evidente.

## **2.7 Propriedades físicas e mecânicas da madeira**

Muitas das propriedades físicas e mecânicas da madeira se correlacionam com a sua densidade. O módulo de Young e de cisalhamento paralelo e perpendicular à grã deste material ortotrópico estão entre estes e têm se mostrado fundamentais para o estudo musical de uma placa vibratória. Na falta de medições detalhadas destes parâmetros para madeiras utilizadas em instrumentos musicais, muitas análises têm se concentrado no módulo de Young paralelo à grã, pois este já foi determinado para um grande número de espécies de madeira [Banco de Dados do Laboratório de Produtos Florestais, IBAMA].

O módulo de elasticidade, juntamente com a densidade da madeira, determina a principal caracterização acústica de um material. Além disso, a dureza (rigidez) transversal é importante sempre que a madeira está sujeita a cargas de impacto, como é o caso de xilofones, que são instrumentos de percussão composto de barras de madeira maciça afinadas em uma escala. Para espécies resinosas e folhosas de grã direita, o módulo de Young e a dureza transversal podem ser estimados a partir da densidade,  $\rho$ , em  $\text{kg/m}^3$  de acordo com as correlações na Tabela 2.2 [Wood Handbook, 2010].

Tabela 2.2- Valores de módulo de Young e dureza em função da densidade ( $\rho$ ) em  $\text{kg/m}^3$  para madeiras.

Propriedade	Coníferas	Folhosas
Módulo de Young (GPa)	$56,3 \rho^{0,84}$	$121,1 \rho^{0,7}$
Dureza transversal (GPa)	$0,229 \rho^{1,5}$	$6,48 \cdot 10^{-3} \rho^{2,09}$

*FONTE: Wood Handbook (2010)*

Outra característica peculiar à madeira e importante para instrumentos musicais é a adaptação às condições ambientais às quais está exposta, particularmente através de trocas de umidade com o ar. As propriedades críticas para o desempenho acústico de uma madeira, como a densidade, módulo de elasticidade, amortecimento e retração (encolhimento) são altamente dependentes das condições de umidade da madeira [Martínez, 2009]. Assim, um critério importante durante o processo de seleção de materiais é também o quanto e quão rapidamente uma madeira troca umidade com o meio ambiente e como a umidade afeta sua estabilidade dimensional e propriedades mecânicas. Em geral, a velocidade de absorção de umidade diminui com o aumento da densidade e conteúdo de extrativos [Marques et al, 2006]. A taxa e a quantidade de absorção de água, juntamente com a estabilidade dimensional da madeira podem ainda ser controladas através de tratamentos com ceras e óleos.

### 2.7.1 Propriedades acústicas da madeira

As propriedades básicas relevantes para tampos são a densidade ( $\rho$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e o coeficiente de amortecimento viscoelástico (expresso na forma de fator de perda)  $\eta$ . Como a resposta do material raramente envolve uma única propriedade, alguns índices de desempenho de materiais foram concebidos para descrever a contribuição da madeira em um tampo [Wegst, 2006].

As propriedades acústicas de um tampo de um violão são determinadas diretamente pelas propriedades mecânicas do material de que são feitas, visto que o som é produzido por vibrações do material em si. O módulo de Young e o fator de perda contribuem de forma significativa na velocidade do som em um material, as frequências naturais excitadas e a intensidade do som radiado. As principais

propriedades acústicas para a seleção de materiais para aplicações em instrumentos musicais são detalhados nos próximos itens.

### 2.7.2 Velocidade do som

A velocidade de ondas longitudinais,  $c$ , com a qual o som se propaga através de um material, é definida como

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

sendo  $E$  o módulo de elasticidade e  $\rho$  a densidade do material.

Aliás, essa relação, que descreve a velocidade de ondas longitudinais em um material, é um parâmetro fundamental na definição das frequências de vibração longitudinal de uma barra. Portanto, a velocidade do som está diretamente relacionada com o módulo de elasticidade e densidade do material, variando também com a direção de granulação. O módulo de elasticidade transversal da madeira é apenas entre 1/20 a 1/10 do longitudinal. Conseqüentemente, a velocidade transversal do som é de 20 a 30% do valor da velocidade longitudinal, aproximadamente.

Geralmente, a velocidade do som na madeira diminui com um aumento de temperatura ou umidade e proporcionalmente à influência dessas variáveis sobre o módulo de elasticidade e densidade. Diminui ligeiramente com aumento da frequência e amplitude de vibração [Wood Handbook, 2010].

### 2.7.3 Fator de perda estrutural (amortecimento)

Quando um material sólido vibra, parte de sua energia mecânica é dissipada na forma de calor por atrito interno. O mecanismo pelo qual isso ocorre na madeira é complexo e depende da temperatura, do teor de umidade em uma amostra e do tipo e quantidade de extrativos característicos para a espécie de madeira em questão. Ao contrário das propriedades físicas descritas anteriormente, o fator de perda, que quantifica o amortecimento de vibrações devido ao atrito interno, é independente da densidade e do módulo de Young.

Devido à natureza complexa da madeira, existem vários mecanismos responsáveis por perdas acústicas e mecânicas de componentes feitos de madeira. A maior fonte interna de amortecimento

está nas ligninas, porque a estrutura das microfibrilas de celulose são bastante cristalinas.

O amortecimento interno é uma característica vibratória da madeira muito importante, que tem sido ignorada em alguns trabalhos relacionados, em parte devido às dificuldades de sua medição. No trabalho de Haines (2000), constam resultados para o abeto com um fator de perda de aproximadamente 0,02. No entanto, há uma grande variação de amortecimento entre as espécies, tornando difícil garantir a precisão de um valor geral para uma determinada peça de madeira. Há também algumas variações de amortecimento com a frequência [McIntyre e Woodhouse, 1978].

O índice conhecido como fator de perda,  $\eta$ , expressa o grau em que um material dissipa energia vibracional por atrito interno. Outra forma de representar o amortecimento é o fator de qualidade,  $Q$ . Para uma excitação próxima da frequência de ressonância e um baixo amortecimento, estas quantidades são relacionadas como [Newland, 1989]:

$$\eta = \frac{1}{Q} \quad (2.2)$$

## 2.8 Relações das propriedades com diferentes escalas de observação

Como um material biológico com uma estruturação hierárquica complexa, o comportamento macroscópico da madeira deriva das contribuições resultantes de diferentes escalas.

Este é, naturalmente, um tema muito mais geral do que o presente caso de madeiras para instrumentos musicais, mas é essencial para a compreensão ou previsão de variações nas propriedades acústicas devido à variabilidade biológica e / ou aos tratamentos aplicados.

O abeto tem sido muitas vezes considerado como material de estudo para algumas pesquisas fundamentais, uma vez que a sua estrutura é relativamente homogênea e "simples" em comparação com a diversidade de espécies de madeira. No entanto, várias das questões relevantes no caso da construção do instrumento, como fatores que afetam a viscoelasticidade na faixa de áudio-frequência, têm sido muito menos discutidas em abordagens multi-escala, do que sob o ponto de vista das propriedades estáticas.

## 2.9 A organização da parede celular

A madeira é formada por células tubulares “vazias”, muito finas (proporção de comprimento para diâmetro  $> 100$ , no abeto) e, principalmente, dispostas de forma paralela ao longo da direção axial. Por conseguinte, ao longo do grão, os parâmetros  $E$  e  $\eta$  da madeira são proporcionais às das paredes celulares. Estas são organizadas como um compósito multicamada, reforçado com fibras. Microfibrilas cristalinas de celulose são depositados, paralelas umas às outras, formando uma hélice em torno da célula. Quando o “ângulo de microfibras” (AMF) em relação ao eixo da célula é pequeno, o comportamento axial é dominado pelas microfibrilas rígidas e elásticas, quando este ângulo é maior, a contribuição da matriz viscoelástica aumenta. Ou seja, com o aumento do AMF,  $E$  diminui e  $\eta$  aumenta. Esta co-dependência geralmente resulta em uma forte correlação entre  $\eta$  e  $E$  [Ono e Norimoto, 1983].

Esta escala apresenta a maior influência sobre o módulo de elasticidade macroscópico específico e a velocidade do som ao longo do grão, e também afeta consideravelmente a anisotropia axial para cisalhamento [Obataya et al, 2000].

## 2.10 Anéis de crescimento

Em coníferas (resinosas) e particularmente no abeto, a grande maioria dos elementos celulares axiais consiste de um único tipo de célula, os traqueídeos, que se desenvolvem de acordo com a época de crescimento, a partir de uma função de “condução” na primavera (paredes celulares finas, dando uma densidade muito baixa ao material), para uma função de “suporte mecânico” no verão/outono (paredes espessas e materiais de alta densidade).

Geralmente, nas resinosas (*softwoods*), a taxa de crescimento mais rápida está associada a uma maior proporção de madeira crescida durante a primavera, sendo os anéis anuais mais largos associados com material de baixa densidade. No entanto, para a “madeira ressonante”, isto é um tanto paradoxal, uma vez que ela é usualmente escolhida pelos anéis estreitos e por possuir uma densidade baixa.

Somente em climas frios, com estações de crescimento reduzido, ou seja, geralmente em florestas de altitude, pode acontecer de uma proporção pequena de madeira crescer durante o verão. No entanto, apesar da importância dada aos anéis anuais na seleção de madeira ressoante pelos fabricantes (como é atestado em alguns tratados técnicos, ou mesmo por normas oficiais para a madeira ressonante na



ex-RDA – Research Data Alliance), nenhuma ou muito pouca correlação pode ser encontrada entre as características macroscópicas mensuráveis dos anéis de crescimento e propriedades vibracionais axiais  $E$  e  $\eta$  [Di Bella et al, 2002]. Na realidade, estas propriedades parecem ser determinadas na escala da parede celular [Hor et AL, 2002 e Kubojima et al, 1997]. De forma isolada, os anéis de crescimento têm pouco significado como indicador de boas propriedades [Jozsa e Middleton, 1994]. De qualquer forma, madeiras de granulação fina são valorizadas pelos construtores, não só por sua aparência, mas provavelmente por haver correlações entre a largura do anel e sua aptidão para uso em instrumentos. Isso precisa ser mais estudado em uma ampla amostragem da madeira ressonante, a fim de obter informações representativas em relação às propriedades acústicas.

### **3 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS**

Este capítulo apresenta as etapas realizadas para determinar as características físicas dos materiais que estão relacionados com a qualidade do som que produzem. Foram realizados experimentos com amostras de diferentes tipos de madeira para medir propriedades tais como densidade, módulo de Young e fator de perda estrutural. Todas as amostras foram testadas em salas climatizadas, com temperatura na faixa de  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa entre 45% e 55%.

#### **3.1 Obtenção de amostras**

Estudos indicam que a maioria da produção madeireira da região amazônica é considerada predatória ou oriunda de desmatamento e que, da produção dita sustentável, grande parte advém de planos de manejo deficientes (Barreto et al., 2002). Sendo assim, foi necessária uma verificação presencial da origem das madeiras a que este projeto se refere. O autor desta pesquisa foi à Itacoatiara, Amazônia, para uma visita técnica a uma madeireira, a fim de conhecer de perto, a 150 quilômetros dentro da floresta, o processo de corte das árvores através do plano de manejo sustentável.

Foi possível acompanhar também a rotina de preparação do material para a utilização na fabricação dos instrumentos no atelier OELE, onde foram obtidas as amostras de madeira bruta. A direção do corte das pranchas dependeu da aplicação. Dessa forma, algumas tiveram corte radial e outras tangencial. As amostras foram preparadas, tendo 8 cm de largura por 3 cm de espessura e 57 cm de comprimento. Foram secas ao ar e acondicionadas a 12% de umidade relativa.

#### **3.2 Determinação da densidade da madeira**

A densidade absoluta ou massa específica de um material qualquer é definida pela relação massa e volume que o corpo ocupa. Nos laboratórios do GIEM (Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira) da Engenharia Civil da UFSC foram realizadas as medidas de massa em uma balança analítica compatível com a massa da amostra de madeira (erro =  $\pm 0,001$  g). Para cada espécie foram usadas dez amostras de dimensões 20 mm x 50 mm x 2 mm. Os resultados são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Valores de densidade média absoluta ( $\rho$ ) para as madeiras analisadas.

	Densidade a 12% de UR [kg/m <sup>3</sup> ]
Abeto	464,88
Cedro	376,90
Marupá	412,80

### 3.3 Determinação do teor de umidade da madeira

Utilizando as mesmas amostras e ainda nos laboratórios do GIEM, onde foi disponibilizada uma estufa de secagem, foi registrada a pesagem inicial da madeira como “peso verde” ( $P_v$ ). Em seguida, colocou-se a madeira na estufa a 102° C, até que a diferença entre duas pesagens consecutivas fosse muito próxima de zero. Anotou-se o valor dessa pesagem como “peso seco” ( $P_s$ ). Nessas condições, define-se o percentual de umidade (U):

$$U = P_u - P_s / P_s \times 100. \quad (3.1)$$

Para cada teste mediu-se primeiramente a massa de cada amostra em condições de temperatura ambiente e após a permanência em turnos de 2 horas na estufa. No fim desse ensaio, concluiu-se que a média de umidade para todas as espécies não ultrapassava 12%. Esse teor de umidade, muito usado em tecnologia da madeira, é designado como “teor de umidade na base seca” e proporciona melhores desempenhos da madeira em aplicação em instrumentos musicais [Marques et al, 2006].

### 3.4 Preparo das amostras em forma de viga

As amostras foram elaboradas a partir do material bruto disponível, sendo tomadas as precauções para que o corte fosse feito nas duas direções relativas aos anéis anuais de crescimento do tronco. A Figura 3.1 ilustra como esse corte é planejado.

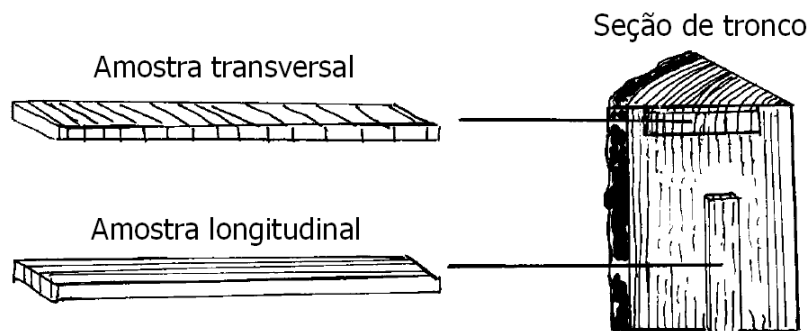


Figura 3.1 - Cortes transversal e longitudinal das amostras.

### 3.5 Levantamento das propriedades dinâmicas

No ensaio obteve-se a curva receptância, para faixa de frequência de 0 Hz a 800 Hz, na qual a excitação foi dada pelo impacto de um martelo de medição na estrutura e a velocidade da extremidade livre, foi medida com um vibrômetro a laser na extremidade do corpo-de-prova. Na Figura 3.2 tem-se o esquema da montagem de instrumentos da bancada.

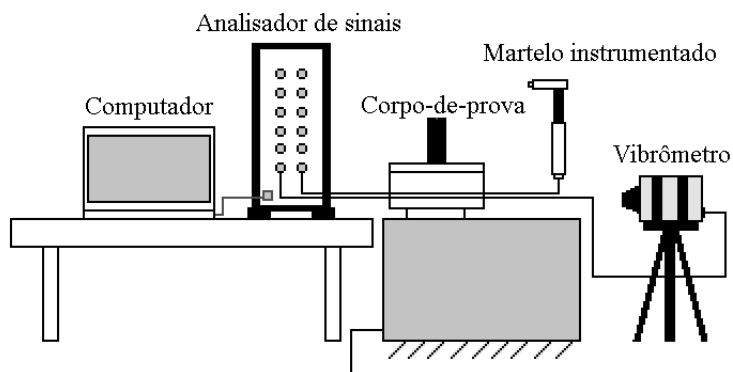


Figura 3.2 - Cadeia de instrumentos utilizada na caracterização de materiais.

Para determinação das propriedades elásticas utilizou-se a Norma ASTM E0756-05, que se baseia na medição da função resposta

em frequência (FRF) para o tipo de corpo-de-prova utilizado, sendo que as propriedades são identificadas pelas frequências naturais da curva.

O corpo-de-prova utilizado foi do tipo viga homogênea como mostra a Figura 3.3.

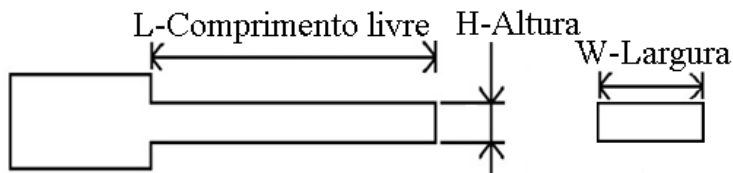


Figura 3.3 - Viga homogênea. Fonte: ASTM E756 - 05 (2005).

O módulo de elasticidade é obtido conforme a equação:

$$E = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{H^2 C_n^2}, \quad (3.2)$$

sendo  $\rho$  a densidade relativa da amostra,  $L$  o comprimento livre da amostra,  $H$  a espessura,  $f_n$  a frequência natural e  $C_n$  uma constante adimensional associada ao modo de flexão  $n$ , em que  $C_1 = 0,55959$ ,  $C_2 = 3,5069$ ,  $C_3 = 9,8194$ , etc.

Pelo método da banda de meia potência [MANDAL; RAHMAN; LEONG, 2004], analisando a FRF experimental, obtém-se o fator de perda do material, através de:

$$\eta = \frac{\Delta\omega_n}{\omega_n} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n}, \quad (3.3)$$

sendo  $\Delta\omega_n$  a largura da banda e  $\omega_n$  a frequência central, em rad/s. Esse método avalia os pontos com metade da potência em que ocorre  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , ou seja, 3 dB abaixo do valor da amplitude referente à frequência central, de acordo com a Figura 3.4.

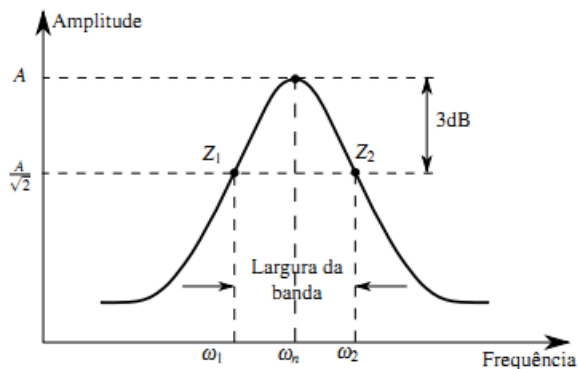


Figura 3.4 - Método da banda de meia potência.

Fonte: ASTM E756 - 05 (2005).

Conforme as Figuras 3.2 e 3.5 apresentam, foram utilizados os seguintes equipamentos: um analisador de sinais (software e hardware *PULSE* do fabricante *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S*), um martelo instrumentado do tipo 8204 PCB Piezotronics, com sensibilidade de 24,1 mV/N; um vibrômetro a laser da marca *Ometron*, modelo VH-1000-D, cuja sensibilidade utilizada foi de 8 V/m/s e um notebook *TOSHIBA* para processamento e armazenamento dos dados.

Foram analisados no total 30 corpos de prova. Para cada uma das amostras foram feitas duas medições, onde se repetiu o processo de montagem e desmontagem de fixação das peças a fim de verificar a repetibilidade. A fixação foi realizada por meio de um sistema de engaste na posição perpendicular através de uma morsa. Foi verificada a coerência das medições das funções resposta em frequência, sendo a referência a medição 1. Todas as amostras foram testadas em salas climatizadas, com temperatura na faixa de  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa entre 45% e 55%. Também foram todas inspecionadas visualmente, a fim de verificar a possível presença de defeitos.

A Figura 3.5 apresenta a bancada experimental, incluindo o sistema de engaste das amostras.



Figura 3.5 - Bancada experimental para teste com vigas.

As Figuras 3.6 e 3.7 representam os resultados das medições para todas as amostras longitudinais para a espécie de madeira abeto (*Picea abes*), sendo que a receptância,  $H(f)$ , relaciona o deslocamento (como integral da velocidade) da extremidade livre do corpo-de-prova com a força do impacto do martelo no mesmo. A Função Coerência é útil como controle de qualidade da medição, pois relaciona o sinal do vibrômetro com o sinal do martelo instrumentado.

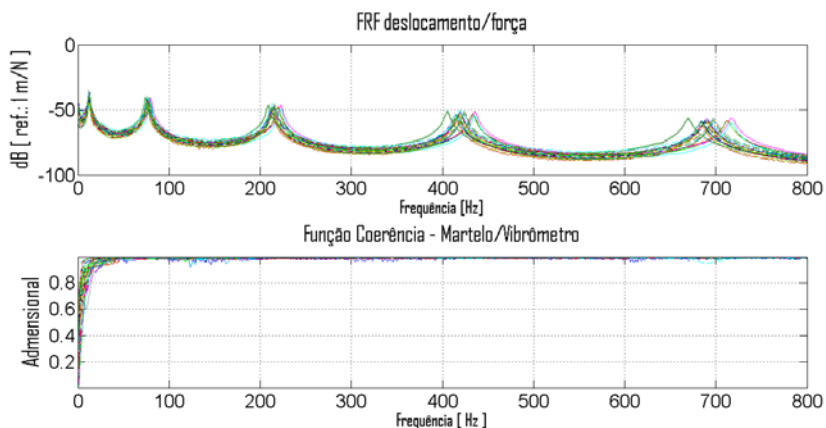


Figura 3.6 - (a) Receptância das 10 amostras longitudinais de abeto, 3 impactos por amostra (b) Função Coerência.

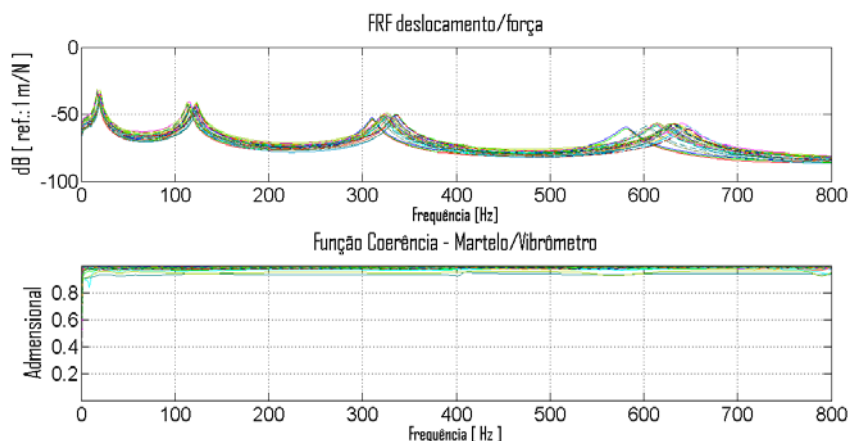


Figura 3.7 - (a) Receptância das 10 amostras transversais de abeto, 3 impactos por amostra (b) Função Coerência.

De acordo com as Figuras 3.6(b) e 3.7(b), a Função Coerência foi idealmente plana próxima da unidade na maior parte do espectro para as amostras longitudinais e transversais de abeto, revelando a boa qualidade das medições.

A dificuldade desse tipo de ensaio está na obtenção de uma martelada com espectro idealmente plano, pois a estrutura de análise apresenta dimensões pequenas e o impacto do martelo na viga deve ser cauteloso para não ocorrer repiques.

Para cada receptância experimental foram calculados os valores do módulo de elasticidade e fator de perda. As Figuras de 3.8 a 3.13 apresentam o valor do módulo de elasticidade em função dos valores em frequência dos primeiros modos de vibração para as três espécies (abeto, cedro e marupá) respectivamente. Cada curva destacada em uma cor em particular representa o resultado individual de uma das 10 amostras medidas, que às vezes se sobrepõem.



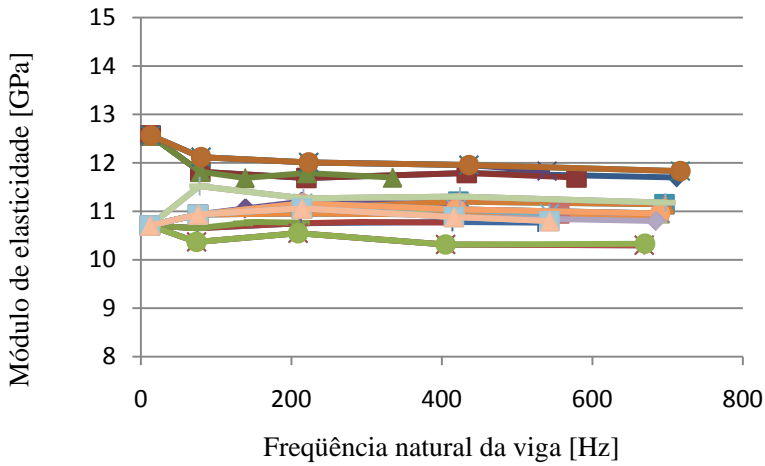


Figura 3.8 - Módulo de elasticidade longitudinal em função da frequência para o abeto.

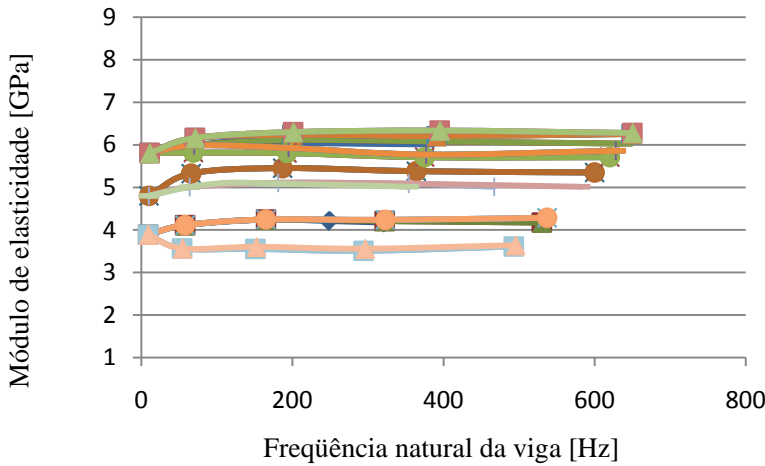


Figura 3.9 - Módulo de elasticidade longitudinal em função da frequência para o cedro.

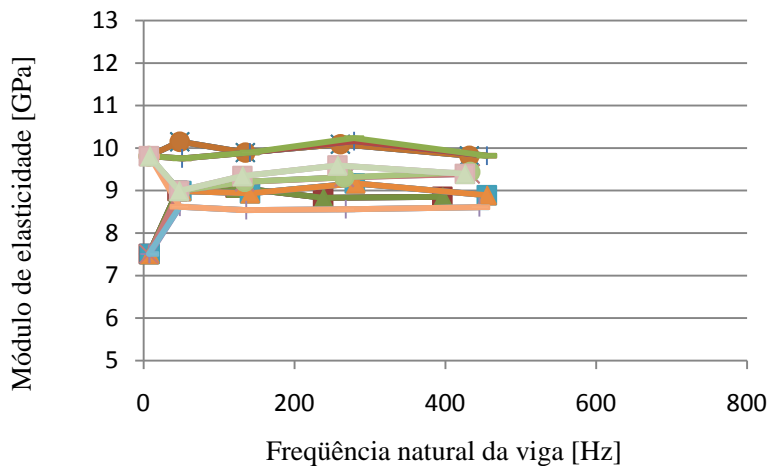


Figura 3.10 - Módulo de elasticidade longitudinal em função da frequência para o marupá.

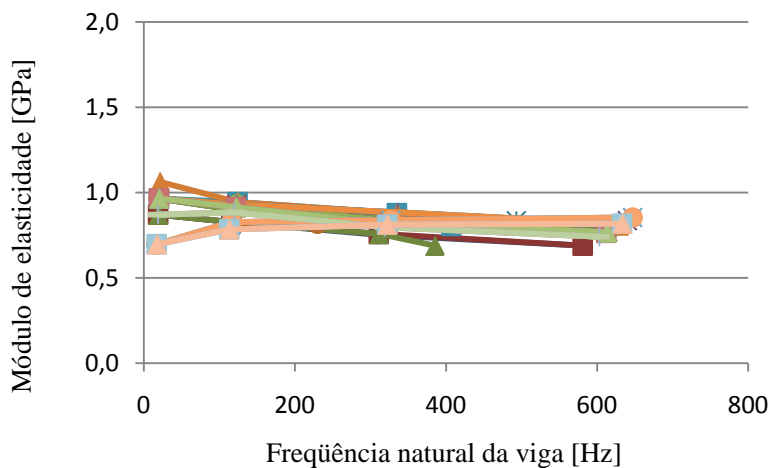


Figura 3.11 - Módulo de elasticidade transversal em função da frequência para o abeto.

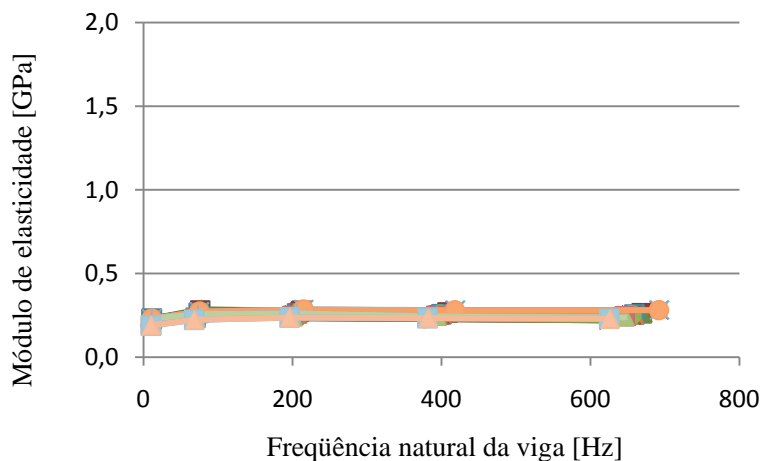


Figura 3.12 - Módulo de elasticidade transversal em função da frequência para o cedro.

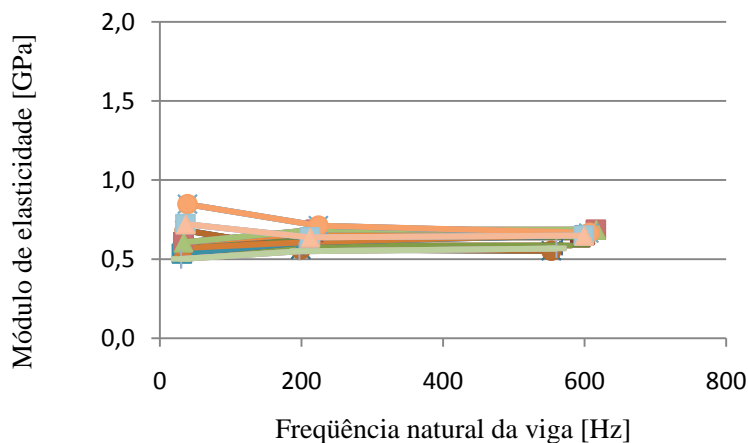


Figura 3.13 - Módulo de elasticidade transversal em função da frequência para o marupá.

As Figuras de 3.14 a 3.19 apresentam o valor do fator de perda em função da frequência para as três espécies.

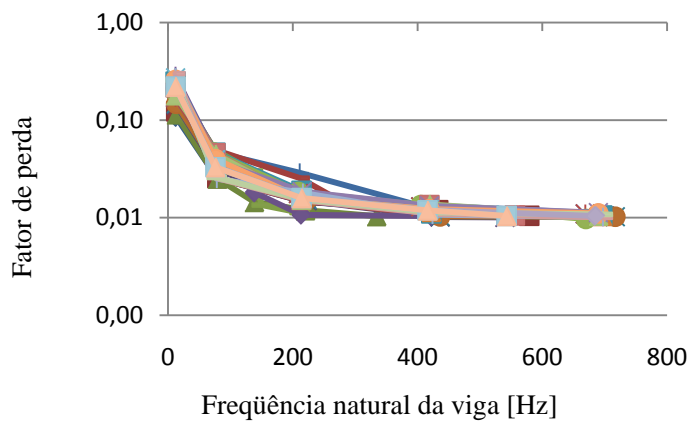


Figura 3.14 - Fator de perda longitudinal em função da frequência para o abeto.

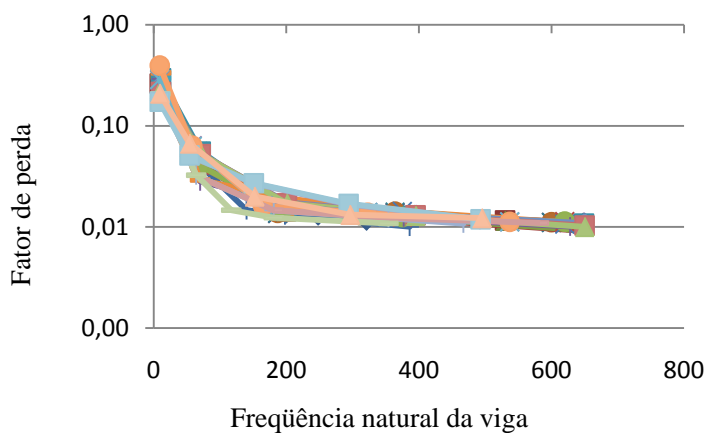


Figura 3.15 - Fator de perda longitudinal em função da frequência para o cedro.

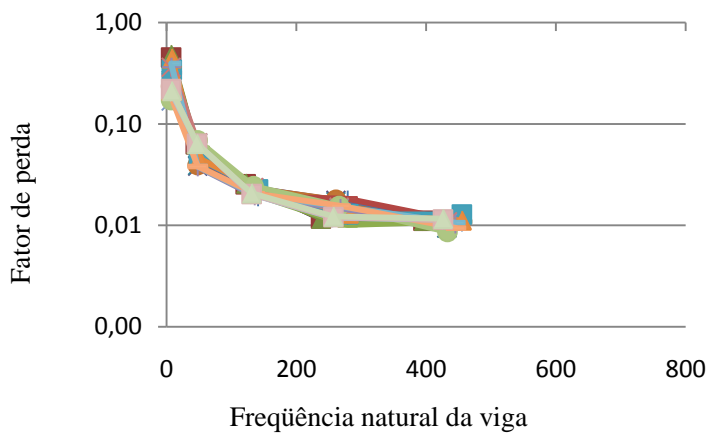


Figura 3.16 - Fator de perda longitudinal em função da frequência para o marupá.

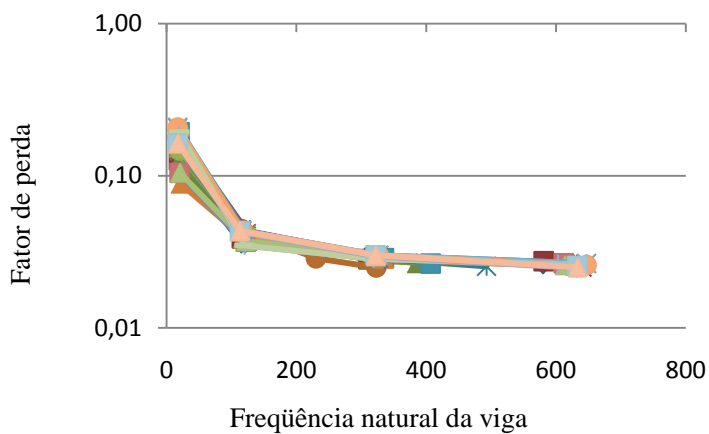


Figura 3.17 - Fator de perda transversal em função da frequência para o abeto.

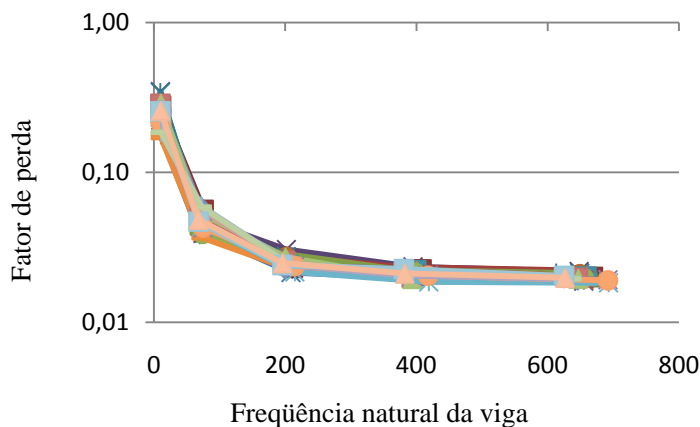


Figura 3.18 - Fator de perda transversal em função da frequência para o cedro.

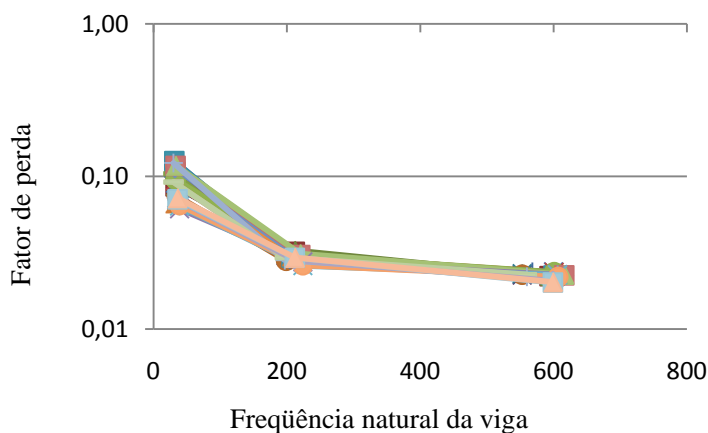


Figura 3.19 - Fator de perda transversal em função da frequência para o marupá.

Para o cálculo dos valores médios do fator de perda, apresentados na Tabela 3.2, foram desconsiderados os valores para a primeira frequência natural, pois a discrepância destes valores em relação aos demais influenciaria erroneamente nos resultados deste parâmetro. Esta discrepância deve-se às condições de suporte do corpo-de-prova, dada a dificuldade em se posicionar as amostras de forma ideal, em um engaste perfeito. Os valores de módulo de elasticidade

apresentados na mesma Tabela 3.2 foram calculados como a média dos módulos de elasticidade obtidos para cada frequência natural.

Tabela 3.2- Valor médio do módulo de elasticidade e do fator de perda para as três espécies, nas direções longitudinal e transversal aos veios da madeira.

	$E_{\text{longitudinal}}$ [GPa]	$E_{\text{transversal}}$ [GPa]	$\eta_{\text{longitudinal}}$	$\eta_{\text{transversal}}$
Abeto	11,1	0,84	0,019	0,031
Cedro	5,17	0,24	0,022	0,028
Marupá	9,18	0,63	0,025	0,026

### 3.6 Validação e ajuste de propriedades

Uma análise modal numérica utilizando FEM [*COMSOL Multiphysics*] foi aplicada à amostra longitudinal de número 10 de abeto, cujas dimensões são  $L = 0,37$  m,  $W = 0,0199$  m e  $H = 0,0022$  m, juntamente com as propriedades mecânicas médias experimentais:  $E = 11,21$  GPa, densidade =  $460,93 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 0,3$  (Poisson), a fim de verificar o comportamento dinâmico desse tipo de estrutura, analisando as formas modais associadas às frequências naturais. A condição de contorno é engastada-livre. O único parâmetro utilizado nesta simulação extraído da literatura é o Poisson [*Material Property Data* (ABS), 2011].

Foi utilizado o elemento tipo casca (*Shell*) para representar a estrutura de placa fina em três dimensões. Dessa forma, é admitida uma simplificação na variação do deslocamento ao longo da espessura, tornando possível desenvolver um modelo para a deformação que se aproxima do estado de tensão plana em duas dimensões. O modelo aplicado, ilustrado na Figura 3.20, apresenta somente as tensões de flexão, que produzem momentos fletores e torsores.

A discretização da geometria foi feita considerando o comprimento de onda de flexão da estrutura dividido por 12, sendo assim o tamanho do elemento obrigatoriamente possui dimensão menor que tal valor calculado. Ao longo do comprimento da viga considerou-se de forma constante a sua espessura, devido ao comprimento de onda de flexão ser alto.



Figura 3.20 - Modelo numérico da viga (vista superior).

A análise revelou as cinco primeiras frequências de ressonância e as respectivas formas modais de flexão, apresentadas na Figura 3.21, que foram utilizadas nos cálculos das propriedades.

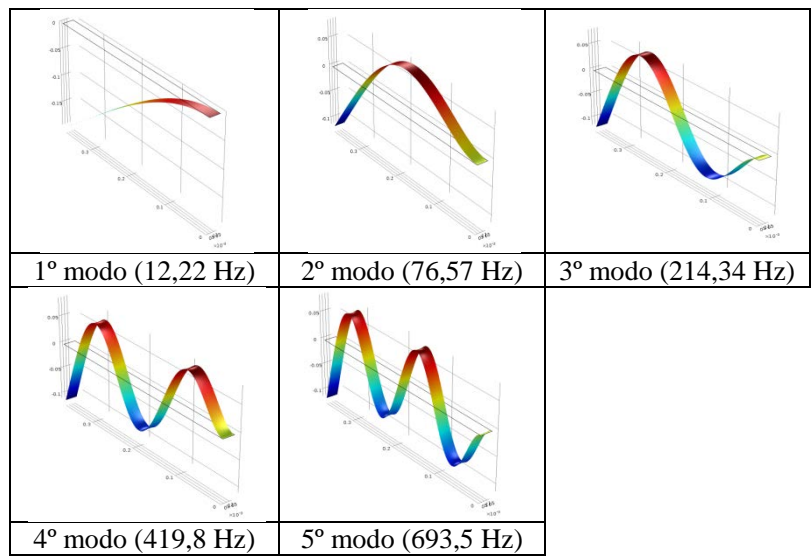


Figura 3.21 - Cinco primeiros modos de flexão da viga longitudinal modelada.

A partir dos valores das propriedades mecânicas utilizadas para a análise modal numérica mostrada anteriormente, foram realizadas análises harmônicas para validação do modelo numérico pelo uso do software COMSOL, considerando inicialmente as dimensões médias das amostras longitudinais de abeto.

De maneira equivalente ao ensaio experimental, engastou-se a amostra numa extremidade. A força que o martelo exerce na estrutura (excitação) foi representada por uma força idealmente pontual e unitária no espectro da frequência, a 3 centímetros da extremidade de engaste, ao longo do eixo que acompanha o comprimento da viga. A resposta em deslocamento ( $20 \cdot \log_{10}[\text{amplitude de deslocamento na direção } z]$ ) foi avaliada no ponto central da extremidade livre, oposta ao engaste. Um dado necessário para esta análise é o fator de perda, sendo utilizadas funções que representam as curvas experimentais variáveis com a frequência.

No entanto, cabe ressaltar que as amostras apresentam pequenas variações de dimensões. A fim de representar uma situação mais



realística de resultado para efeito de comparação com dados experimentais, a curva numérica foi inserida no contexto dos resultados para todas as amostras longitudinais de abeto e foi verificado que aquela a qual mais se aproximava dos resultados obtidos era a amostra de número 10. Dessa forma, as dimensões do modelo numérico foram atualizadas pelas dimensões exatas desta amostra, ao invés de uma média das dimensões (comprimento, largura e espessura) de todas as amostras, o que melhorou a concordância entre os resultados obtidos.

A Figura 3.22 apresenta as curvas de receptância numérica (azul) e experimental (em vermelho, resultado da média de 3 medições) da amostra longitudinal de abeto número 10. As demais curvas em cinza são os resultados experimentais das outras 29 amostras longitudinais de abeto.

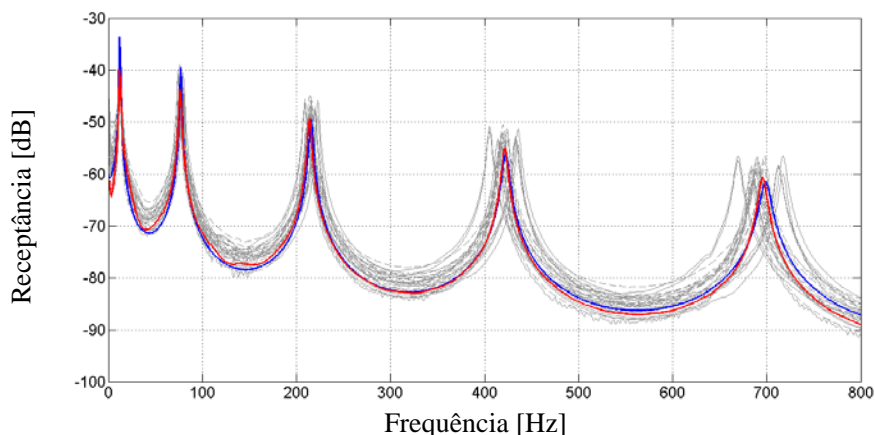


Figura 3.22 - Receptâncias das amostras obtidas numérica e experimentalmente.

A análise revela que as curvas apresentam boa concordância e que, apesar de uma pequena diferença de amplitude nas altas frequências, devido ao posicionamento dos nós de excitação e resposta não serem exatamente os mesmos nos modelos, é possível utilizar o tipo de elemento proposto para representação da geometria estudada nesta etapa, ou seja, vigas finas de madeira. As amostras testadas são representativas, sendo que apresentam uma maior variação nos valores de propriedades associadas ao primeiro modo, devido às condições de suporte do corpo-de-prova. Tal fato não representou um fator

impactante nos resultados comparativos entre o modelo numérico e os dados experimentais, sobretudo nos primeiros modos.

## 4 ANÁLISE MODAL DO TAMPO

As vibrações estruturais de instrumentos musicais de cordas possuem amplitude muito pequena, tipicamente da ordem de 1 micrômetro (1 $\mu$ m). A extrapolação de métodos disponíveis para medir as vibrações em um ponto (por exemplo, por meio de acelerômetros), permite a avaliação de movimento em toda a superfície do instrumento. As técnicas de interferometria ótica desenvolvidas na década de 1960 representaram um avanço bastante sensível para as pesquisas em acústica musical [Richardson, 2010], provendo muito mais informação do que os métodos anteriores, tais como padrões de Chladni (explicados na nota de rodapé nº 4), que detectavam apenas a posição das linhas nodais. A análise modal se tornou amplamente utilizada por descrever as propriedades dinâmicas de uma estrutura em termos dos parâmetros modais: frequência natural, fator de amortecimento, massa modal e modos de vibração. A análise pode ser feita tanto experimentalmente como numericamente. Na análise modal numérica, tenta-se desacoplar as equações estruturais de movimento dos modos de forma que cada equação desacoplada possa ser solucionada separadamente. Quando soluções exatas não são possíveis, são usadas aproximações numéricas, tais como o método de elementos finitos e de elementos de contorno [Rossing, 2007].

Na análise modal experimental tradicional, uma força aplicada em um ponto excita a estrutura, sendo a resposta medida em um ou mais pontos, para a construção de funções de resposta em frequência [Jordan, 2010]. Pode-se usar uma excitação senoidal, aleatória, pseudo-aleatória, ou impulsiva. A resposta pode ser medida de forma mecânica ou opticamente.

O teste com martelo é o tipo mais comum de teste por impacto. Um acelerômetro é fixado em um ponto, e a estrutura é excitada em tantos pontos quanto seja necessário para definir as suas formas modais. Usando um analisador FFT de dois canais, as FRFs são computadas, uma de cada vez, entre cada ponto de impacto e ponto de resposta fixa. Normalmente se desenha uma sequência de pontos na estrutura, em forma de uma grade, para definir os pontos de impacto.

Nem todas as estruturas podem ser analisadas através de impacto. Às vezes, a superfície é muito delicada para uma análise modal experimental.

A maior parte das análises modais experimentais se baseia em uma estimativa dos parâmetros modais (ajustes de curva) a partir das

FRFs. Neste trabalho, uma análise modal experimental foi utilizada para verificar os resultados obtidos com o método numérico.

Para obter as frequências naturais, modos de vibração e amortecimento da estrutura, é necessário definir a estrutura em estudo, a entrada do sistema (excitação) e a saída (deslocamento, velocidade ou aceleração), assim pode-se calcular a resposta em frequência do sistema e posteriormente estimar os parâmetros modais.

A fim de validar as primeiras modelagens numéricas e adquirir intimidade com o sistema de medição da instituição estrangeira (LAM - ESMAE), o trabalho inicial consistiu na análise experimental de uma estrutura simples, o instrumento musical chamado *BellPlate* [Portela et al, 2012]. Através das comparações realizadas, foi possível verificar a validade do modelo numérico, que representou bem as formas modais e as respectivas frequências naturais da placa suspensa. Este experimento e seus resultados não são descritos nesta tese por não representarem nenhuma novidade sobre o tema de análise modal, por abordar uma geometria simples e um material isotrópico.

#### **4.1 Análise do tampo do violão em condição livre**

Consideram-se as estruturas estudadas como tendo um comportamento linear e invariante ao longo do tempo, o que garante que as medições experimentais feitas em momentos diferentes são consistentes. Dessa forma, as medidas de entrada e saída que tenham sido coletadas contêm informações suficientes para gerar um sistema de comportamento padrão observável.

Foram estudadas três espécies de madeira: abeto (*Picea abies*), cedro (*Thuja plicata*) e marupá (*Simarouba amara*). Três tampos fabricados de cada um desses materiais foram analisados experimentalmente para caracterizar o comportamento de cada material. O processo utilizado para a fabricação foi controlado, sendo os cortes feitos a laser e as colagens das barras harmônicas e estruturais também padronizadas. A espessura dos tampos é de 3 mm. O material usado para as barras estruturais e harmônicas para todos os tampos foi a mesma espécie de abeto (*Picea abies*).

Estas medições têm o objetivo de estudar a influência de cada espécie de madeira no comportamento vibracional da estrutura e, em seguida, ajustar o modelo com os resultados numéricos feitos em elementos finitos.



Tampo em abeto



Tampo em cedro



Tampo em marupá

Figura 4.1 - Tamos livres usados na comparação das três espécies.



Figura 4.2 - Exemplo de barramento harmônico (projeto *Torres*) comum a todos os tampos analisados. Orientação das fibras na direção vertical da figura.

São chamadas de travessas ( $T_1$  e  $T_2$ ) as duas barras, fabricadas em abeto (*Picea abies*), orientadas transversalmente em relação às fibras da madeira, localizadas imediatamente acima e abaixo da boca do tampo (ver Figura 4.2). As barras de reforço da boca (RB) são estruturas de menor espessura, confeccionadas com o mesmo material (abeto), posicionadas nas bordas internas da boca, no sentido longitudinal às fibras do tampo. A ilustração detalhada destas barras é apresentada a seguir.

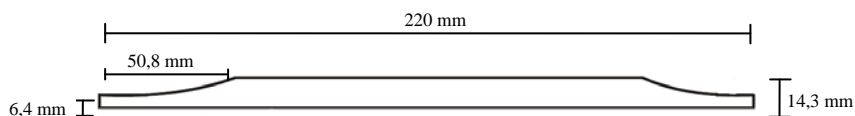


Figura 4.3 - Geometria típica das travessas de reforço (adaptada de [Gomes et al 2004]).

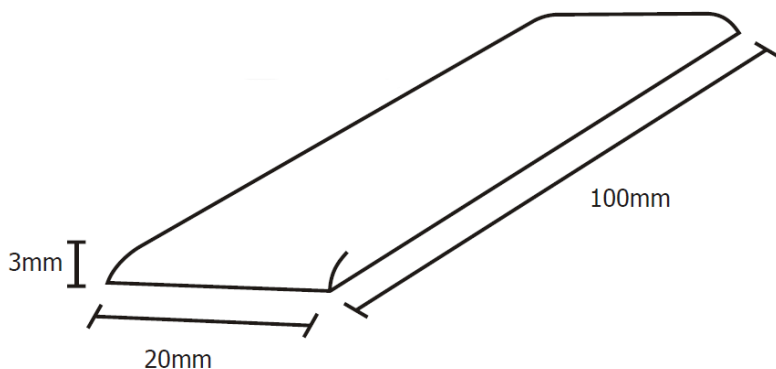


Figura 4.4 - Geometria típica das barras de reforço da boca (adaptada de [Gomes et al 2004]).

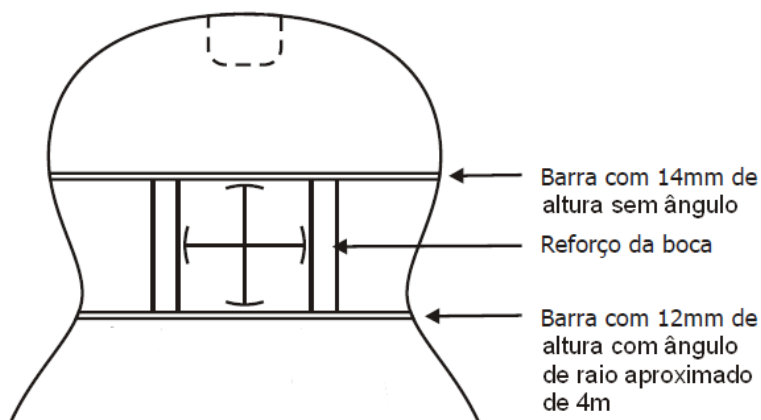


Figura 4.5 – Posicionamento das barras de reforço (adaptada de [Gomes et al 2004]).

Em seguida, procedeu-se o posicionamento das barras harmônicas, cujo material é o mesmo que o das barras de reforço. Sua geometria e características são descritas nas figuras a seguir:

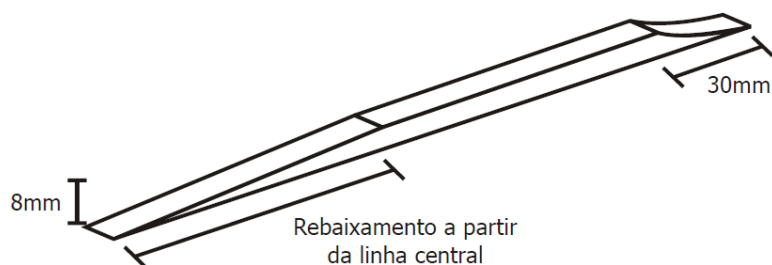


Figura 4.6 – Geometria de uma barra harmônica (adaptada de [Gomes et al 2004]).

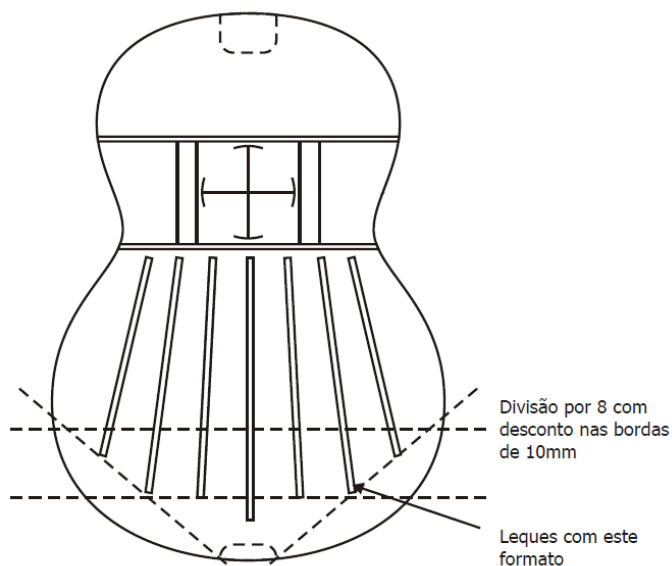


Figura 4.7 – Posicionamento das barras harmônicas (adaptada de [Gomes et al 2004]).

Até aqui foram descritos os elementos que formam a estrutura do tampo, mas cabe lembrar que essa descrição não estará completa sem



que seja considerada a cola que os une. Apesar dos violões poderem ser feitos usando-se praticamente qualquer substância capaz de fixar as partes de madeira com resistência o suficiente, as duas opções mais populares entre os *luthiers* são as colas animais (feitas de pele animal) e o acetato de polivinila (PVA). Esta escolha tem sido objeto de muito debate e não há qualquer consenso [French, 2009]. As análises experimentais entre os tampos apenas garantem que estes foram colados da mesma forma (usando-se a cola de acetato de polivinila). No modelo numérico, inicialmente testou-se introduzir uma constante de mola como uma função dos deslocamentos relativos entre as superfícies, não obtendo resultados satisfatórios. Passou-se a considerar todas as junções como contatos com aderência (através da funcionalidade de condição de contorno *Prescribed Displacement*, do software *COMSOL*), sendo a rigidez alta o suficientemente para garantir uma penetração insignificante entre as superfícies na máxima carga compressiva esperada. No entanto, o autor admite que a cola tem uma relação direta com o som, volume, amortecimento de vibrações e o amortecimento geral de um instrumento musical.

Não foi considerada a aplicação de nenhum acabamento, como verniz ou qualquer tipo de tinta, tanto nos experimentos quanto nas simulações.

## 4.2 Análise modal experimental do tampo livre

Para escolher o método mais adequado de excitação da estrutura é necessário considerar a faixa de frequência de interesse, a energia necessária para excitar adequadamente os modos de vibração, bem como o possível amortecimento da estrutura. Basicamente, é possível considerar dois tipos de excitação [Jordan, 2010]. A primeira maneira implica no uso de dispositivos que permanecem conectados à estrutura ao longo do experimento. O segundo tipo utiliza equipamentos que aplicam a excitação durante um período relativamente curto, como o martelo de impacto usado neste trabalho.

O martelo utilizado dispõe de opções de ponteiros e de massa adicional, que servem para estender a gama de frequências e os níveis de força, de acordo com as necessidades que surgem em cada análise. Além disso, no interior do martelo está inserido um transdutor de força que gera um sinal correspondente à força aplicada à estrutura. O sinal de excitação gerada pelo martelo é tratado como um sinal de impulso.

A magnitude do impacto é determinada pela massa do martelo e da velocidade de impacto. A gama de frequências de excitação depende

da rigidez de superfície do material de contato, do tipo de ponteira e da massa do martelo.

Para capturar a resposta da estrutura foi utilizado um acelerômetro (ver Tabela 4.1). Os dados coletados pelos transdutores são digitalizados e processados através da Transformada de Fourier, que transforma o sinal a partir do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo assim a obtenção da função de resposta em frequência (FRF). A FRF é a entrada mais comumente utilizada na estimativa dos parâmetros modais, no contexto análise modal experimental, sendo definida como a relação complexa entre os sinais de saída e de entrada para uma excitação única, ou múltipla, de forma a estabelecer a relação força-deslocamento do sistema. Uma vez obtida a FRF, esta é usada como entrada no processo de estimativa dos parâmetros modais.

#### **4.2.1 Bancada experimental**

A bancada experimental é constituída pelos sistemas de excitação, de obtenção da resposta e de análise dos sinais. O sistema de excitação usado foi um martelo transdutor (ver Tabela 4.1) gerando um sinal impulsivo no tempo, que apresenta no domínio da frequência um espectro plano na banda de frequência de interesse, ou seja, até 2 kHz. Cabe ressaltar que a frequência fundamental mais alta da escala do violão é próxima a 1 kHz e a maior parte dos modos usados nas comparações não passam de 800 Hz. A resposta da estrutura é obtida por dois acelerômetros (ver Tabela 4.1), pois assim aumentam as possibilidades de coletar mais dados significativos com a sobreposição de medições em regiões diferentes do tempo. Tanto o sinal de excitação gerada pelo martelo como a resposta de cada acelerômetro são adquiridos por um analisador de sinais (ver Tabela 4.1).

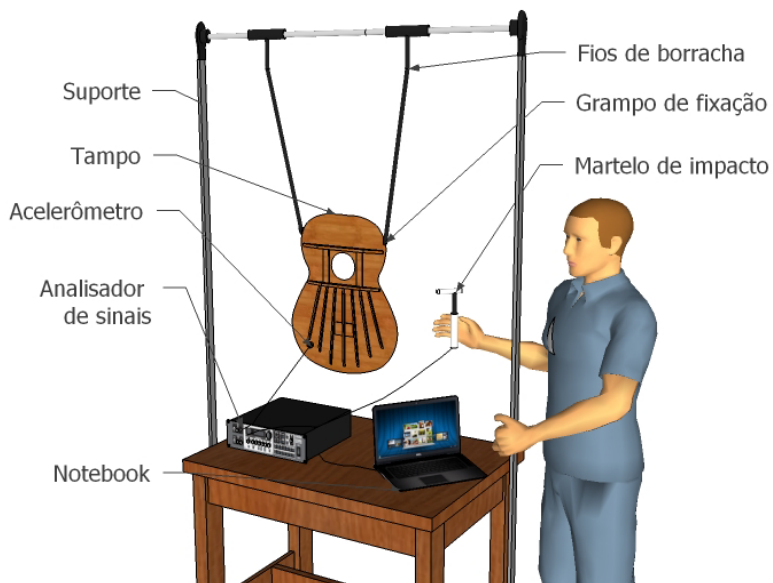


Figura 4.8 – Bancada experimental para os tampos livres.



Figura 4.9 – Bancada experimental sendo utilizada.

Tabela 4.1- Instrumentação e hardware de medição.

Equipamento	Fabricante	Modelo	Serial	Sensibilidade	Canal de entrada
Martelo de impacto	Mmeggitt Endeveco	2302 – 10	2983	2,250 m V/N	Ch1
Acelerômetro	B&K	Deltatron type 4507B	30061	9,952 m V/ms <sup>-2</sup>	Ch2
Acelerômetro	B&K	Deltatron type 4507B	30062	9,170 m V/ms <sup>-2</sup>	Ch3
Analizador de sinais	Siglab	20-42	11770	-	-

Os dados obtidos no analisador foram exportados para um software de análise modal (*Star7*), que a partir da resposta de diferentes pontos da estrutura calcula os parâmetros modais e os modos de vibração, abrangendo a faixa de frequência em estudo.

#### 4.2.2 Procedimentos adotados

A banda de frequência considerada foi de 20 Hz a 2000 Hz. O tempo de amostragem foi determinado em  $t = 1,25$  ms e a resolução em frequência  $Df = 0,5$  Hz. Cada resposta foi obtida a partir da média de três medições, de forma a minimizar erros aleatórios.

Para fixar o acelerômetro à estrutura foi usada uma camada fina de cera de abelha. Este tipo de recurso evita movimentos relativos entre a estrutura e o transdutor, e otimiza a faixa de operação do acelerômetro, uma vez que a sua frequência de ressonância quase não é alterada.

Todos os tampos foram testados em salas climatizadas, com temperatura na faixa de  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa entre 45% e 55%. As sessões de medição foram feitas ao longo de datas diferentes. A configuração utilizada para a medição foi em condições de fronteira livre, impedindo que o ambiente influenciasse sobre a resposta do sistema. Cada tampo foi pendurado por meio de cabos elásticos (garrote cirúrgico de látex), apoiados em uma estrutura rígida (vigas metálicas) ligados às paredes.

Os resultados experimentais foram obtidos através da excitação de cada estrutura em 154 pontos distribuídos simetricamente em torno

da linha de centro do tampo, em uma configuração de rede (Figura 4.10). Cada um dos pontos recebeu 3 impactos, resultando em uma curva média por nó.

Uma malha de pontos de 3 cm x 3 cm foi definida para cada tampo da mesma forma. Todos os pontos de medição foram identificados de acordo com o eixo ortogonal definido da seguinte forma: X: direção positiva das cordas mais agudas para as cordas de baixa frequência; Y: direção positiva a partir do cavalete no sentido do braço; Z: direção positiva do fundo para o tampo.

As posições dos pontos fixos de resposta, destacados na Figura 4.10 por meio de setas largas, foram escolhidas de forma a representar comportamentos vibracionais de regiões importantes na vibração do tampo: próximo à borda do cavalete (ponto 125) e na região de transição de rigidez imposta pelas barras de reforço transversais (ponto 69).

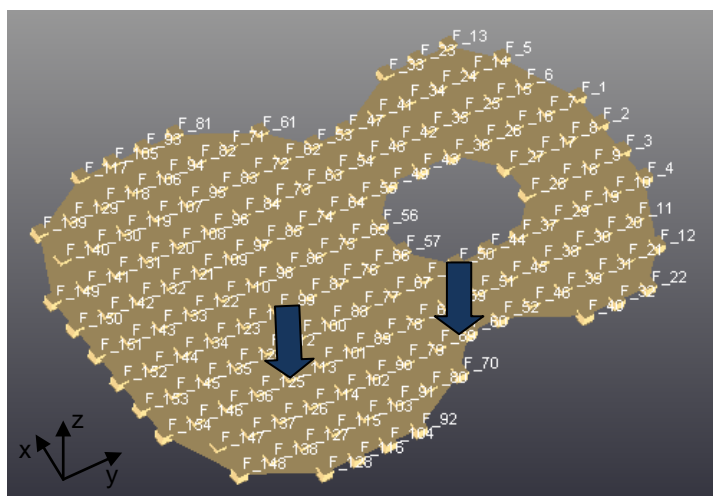


Figura 4.10 – Distribuição dos pontos experimentais medidos.

Os parâmetros do modelo (frequências naturais, fatores de amortecimento modais, constantes modais e modos de vibração) foram ajustados de acordo dados experimentais obtidos.

Existem várias técnicas para estimar parâmetros modais, uma vez que podem ser calculados no domínio do tempo ou da frequência, considerando-se várias entradas simultâneas para o sistema ou somente uma. Dependendo da combinação destes fatores, diferentes técnicas são aplicadas.

Neste trabalho, foram utilizadas duas técnicas: Técnica exponencial complexa de mínimos quadrados (*Least Squares Complex Exponential*, LSCE) e Técnica no domínio da frequência de mínimos quadrados (*Least Squares Frequency Domain*, LSFDF). A técnica LSCE permite a estimativa simultânea da frequência e do amortecimento dos modos de vibração do modelo. Com este método, todos os registros são analisados simultaneamente, obtendo-se uma estimativa global dos parâmetros modais. Considera-se uma única entrada no sistema e trabalha-se no domínio do tempo. [*Users Manual: Lms*]. Para tal, assumiu-se que o sistema atende ao princípio da reciprocidade, entre as posições do acelerômetro (resposta) e martelo (excitação). Isto permitiu considerar um ponto de excitação na posição acelerômetro e múltiplos pontos de resposta (154 impactos). Dessa forma, o sistema pode ser descrito como tendo uma entrada e várias saídas.

De posse dos valores das frequências e amortecimentos correspondentes aos diferentes modos de vibração da estrutura, utiliza-se a técnica LSFDF para estimar os coeficientes das formas modais [Maia e Silva, 1997].

Os modos de vibração representam a configuração da estrutura quando esta vibra na respectiva frequência de ressonância. Assim, o valor absoluto das componentes que constituem cada vetor relacionado ao modo de vibração não tem qualquer significado, sendo somente importante a relação entre eles. Sendo assim, é comum representar os modos de vibração de forma a facilitar a interpretação e a comparação entre eles. A forma de normalização dos modos de vibração mais usada, em virtude das simplificações na representação da equação de movimento, é a normalização em relação à matriz de massa. Sendo assim, após a obtenção das constantes modais para determinar as amplitudes dos modos, a massa modal foi normalizada à unidade,  $m_r = 1$ .

### 4.3 Análise modal numérica do tampo livre

Foi inicialmente aplicado o método de modelagem por elementos finitos a uma estrutura simples - chapa metálica retangular. Neste ponto, já havia sido realizada a análise experimental nesta estrutura, que forneceu os dados de entrada para o modelo ser validado [Portela et al, 2012]. Este procedimento inicial teve como objetivo um treinamento no uso dos softwares utilizados nesta análise. Para esta etapa, foi utilizado o software de elementos finitos: COMSOL

*Multiphysics*. Em seguida, foi aplicado o método numérico à modelagem do tampo do violão.

Conforme ilustra a Figura 4.11, uma malha do tipo *free tetrahedral* foi elaborada com um tamanho máximo de elemento de 2,5 mm. A malha consiste de 44.955 elementos com um total de 531.438 graus de liberdade.

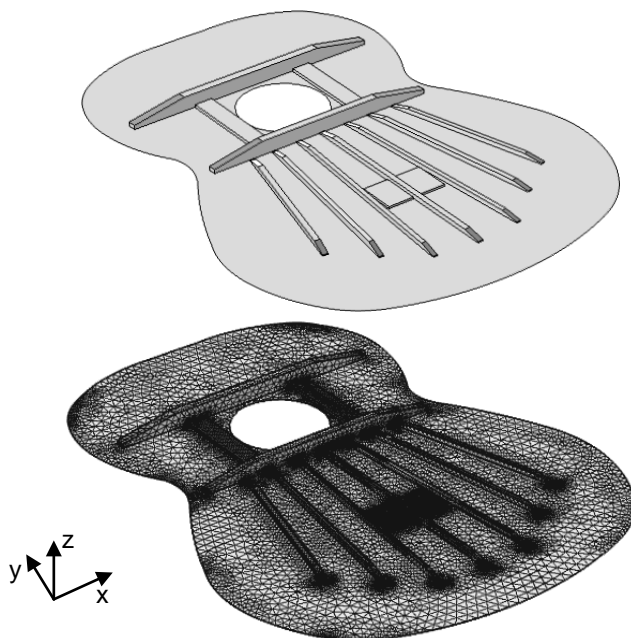


Figura 4.11 – Geometria do tampo simulado e sua respectiva malha.

Optou-se por uma combinação de duas abordagens físicas, dependendo da parte da estrutura a ser analisada. Para a placa do tampo e os reforços da boca e do cavalete, foram usados elementos do tipo casca (*shell*), pois são indicados para a modelagem de estruturas finas e tridimensionais, considerando que a espessura é pequena em comparação com as outras dimensões [COMSOL]. Os graus de liberdade por nó são cinco: três deslocamentos ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) e duas rotações ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ). A direção “y” é paralela às fibras da madeira, a direção “x” é perpendicular às fibras no plano do tampo e a direção “z” é perpendicular a este plano.

Para modelar as barras transversais e harmônicas foram utilizados elementos sólidos tridimensionais, através da abordagem física *Solid Mechanics* do módulo *Structural Mechanics* do software COMSOL. A interface é própria para análise de tensões e mecânica dos sólidos, onde já não se aplicam as simplificações geométricas, resolvendo todos os deslocamentos e rotações. A separação em vários elementos da secção de cada barra é realizada, sendo suas espessuras equivalentes a, no máximo, 1/3 das dimensões respectivas da secção transversal de cada barra. Essa abordagem requer uma malha mais refinada e maior número de elementos. A ligação dessas estruturas ao tampo foi realizada através de um recurso do software que prescreve o deslocamento/rotação dos nós comuns previamente definidos na geometria.

Um elevado número de elementos minimiza distorções na representação da geometria e, conseqüentemente, minimiza erros nos resultados. A malha utilizada pode ser vista na Figura 4.11.

Todas as placas dos tampos foram simuladas com 3mm de espessura. Valores de densidade utilizados na simulação dos tampos são descritos na Tabela 3.1. Os materiais, no caso as espécies de madeira estudadas, são consideradas lineares e elásticas. O nível de anisotropia do material é definido pelo tipo de tensor elástico escolhido. Para simular o comportamento de vibração dos tampos considera-se que o material é ortotrópico [Perkins, 1967; Bodig e Jayne, 1982; Dinwoodie, 2000; Goodman e Bodig, 1971; Hermanson et al., 1997; Sliker et al., 1994; Mascia, 1991] e que o tensor elástico corresponde ao caso de uma placa de tensão plana, o qual é definido por seis constantes elásticas: módulo de Young na direção paralela à linha das fibras de madeira ( $E_y$ ), o módulo de Young perpendicular às fibras da madeira ( $E_x$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu_{xy}$ ), e os módulos de cisalhamento nas direções principais ( $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ ).

Para um modelo ortotrópico elástico linear, as seguintes relações podem ser consideradas [Cofer e Hermanson, 1999]:

$$\frac{\nu_{xy}}{\nu_{yx}} = \frac{E_x}{E_y} \quad (4.1)$$

$$\frac{\nu_{yz}}{\nu_{zy}} = \frac{E_y}{E_z} \quad (4.2)$$



$$\frac{v_{zx}}{v_{xz}} = \frac{E_z}{E_x} \quad (4.3)$$

Ao introduzir as propriedades dos materiais ortotrópicos em três dimensões, devem-se garantir as condições de simetria. Considerando o corte radial feito na madeira e a pequena espessura em relação às outras dimensões, as propriedades do material nas direções perpendiculares à direção das fibras são consideradas iguais, o que configura uma isotropia transversal ao eixo indicado pela direção y. A partir disso, os módulos de cisalhamento foram calculados a partir da seguinte relação [Furlani, 1995]:

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2 E_y v_{xy}} \quad (4.4)$$

Estas propriedades foram utilizadas como variáveis no modelo de elementos finitos para ajustar os modos de vibração e as frequências de vibração naturais com os resultados experimentais. Os valores de propriedades para diferentes espécies de madeira estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Propriedades dos materiais simulados.

Espécie	$E_y$ [GPa]	$E_x$ [GPa]	$v_{xy}$	$G_{xy}$ [GPa]	$G_{yz}$ [GPa]	$G_{xz}$ [GPa]
Abeto	10,1	0,84	0,03	0,4	5,39	0,32
Cedro	5,21	0,245	0,03	0,12	2,53	0,1
Marupá	9,19	0,628	0,03	0,3	4,46	0,24

Como já referido, o material é considerado ortotrópico, porém a aproximação de tensão plana anteriormente considerada na placa do tampo não é válida nas barras, que são sempre feitas de abeto, independente da espécie de madeira usada no tampo. Dessa forma, é necessário definir coeficientes de Poisson nas três direções principais. Para estas estruturas, os valores das propriedades aplicadas são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Propriedades aplicadas às barras harmônicas e de reforço.

Espécie	$E_y$ [GPa]	$E_x$ [GPa]	$E_z$ [GPa]	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ [GPa]	$G_{yz}$ [GPa]	$G_{xz}$ [GPa]
Abeto	10,1	0,84	0,84	0,03	0,03	0,3	0,4	5,39	0,32

O resultado das simulações permitiu algumas conclusões sobre o comportamento dinâmico do tampo do violão e as metodologias adequadas para abordar sistemas complexos de vibração, através da análise modal feita por meio experimental e numérico. As comparações entre os resultados das aplicações de diferentes espécies de madeira em estruturas semelhantes podem ser verificadas no próximo capítulo.

## **5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TAMPO LIVRE**

Nesse capítulo é analisado o comportamento de três tampos do violão clássico, em condições de contorno livre-livre, como uma função das propriedades mecânicas de três espécies de madeira, por meio da comparação dos resultados experimentais e numéricos. Diferentes ferramentas teóricas são usadas para a observação dos dados obtidos, a fim de extrair a maior quantidade de informações que possam evidenciar a influência das características da madeira no comportamento vibracional dos tampos, dado que sua geometria é idêntica.

### **5.1 Funções resposta em frequência (FRFs)**

A primeira forma de análise entre as medições reais pode ser fornecida pelas funções de resposta em frequência (FRFs), que são derivadas a partir de análise espectral e posterior processamento das medições das respostas originais. A metodologia utilizada consistiu na determinação experimental dos modos de vibração dos tampos a partir das funções resposta em frequência em diferentes pontos da estrutura analisada. Cabe lembrar que cada tampo teve como resultado 154 FRFs relacionadas às médias dos impactos em cada ponto da malha definida. Em paralelo, os mesmos modos foram obtidos através de uma análise modal numérica, considerando as mesmas condições de contorno, ou seja, tampo livre em todas as suas bordas. Nas Figuras 5.1 a 5.3, estas funções de resposta são apresentadas, em sua forma mais simples, com uma função de resposta somatória, e são comparadas através da sobreposição da curva medida com a simulada. A curva soma é a média das FRFs medidas ou simuladas, dividida pelo número de amostras, e foi utilizada com o intuito de evidenciar os modos mais representativos da estrutura analisada.

O amortecimento inserido no modelo numérico (apresentado nas Figuras 3.15 a 3.19) tem uma influência direta nas amplitudes das ressonâncias, limitando a nitidez dos seus picos.

A rigor, a determinação dos modos a serem contemplados na análise deve ser feita antes de qualquer comparação da função de resposta. O número reduzido de modos incluídos na apresentação dos resultados desta seção (até 400 Hz) representa apenas uma parte do conteúdo espectral resultante da avaliação vibracional da estrutura dos tampos. É importante ressaltar que o objetivo deste estudo é fornecer ao leitor informações úteis e aplicáveis ao processo construtivo do instrumento. É ainda interessante verificar que, no dia a dia de um

construtor experiente, poucos parâmetros relativos aos primeiros modos do tampo do violão são suficientes para prever a resposta em baixa frequência e também as tendências gerais na faixa de médias frequências. Se não fosse dessa forma, seria improvável que o artesão conseguisse ter o controle necessário para garantir uma consistência de um instrumento para outro, o que geralmente é observado [Richardson, 2002].

As muitas discussões sobre a "afinação" de modos (*tuning*) [French, 2009] indicam que há algumas frequências de ressonância preferidas para alguns modos e, de fato, mesmo a literatura científica confirma que tal ajuste dos modos pode ser usado para controle de qualidade durante a fabricação de instrumentos. No entanto, somente o ajuste dos modos do tampo solto não parece ser suficiente para garantir a qualidade final do instrumento, mas é importante observar que, na prática, os construtores tradicionais geralmente mantêm a frequência fundamental do instrumento dentro de um semitom<sup>6</sup> ou dois de uma mesma posição "padrão", por exemplo.

Além disso, uma forma de garantir que os modos comparados identificados no tampo solto são de caráter vibratório semelhante (torção, flexão longitudinal e flexão transversal) é através da visualização das formas modais (Figuras de 5.6 a 5.13). As formas modais associadas aos modos superiores (acima de 400 Hz) não apresentaram uma identificação visual que permitisse fazer a relação direta com o caráter vibracional dos modos fundamentais. Este foi um dos motivos que impossibilitou a análise conceitual modo a modo para essa faixa de frequência.

---

<sup>6</sup> Um semitom é o menor intervalo utilizado na escala diatônica, e corresponde ao intervalo entre duas notas produzidas ao apoiar o dedo sobre duas casas adjacentes na mesma corda de um violão. No sistema de afinação conhecido como temperamento igual, todos os doze semitons que formam uma escala cromática têm exatamente 1/12 de uma oitava e qualquer intervalo diatônico pode ser expresso como um número equivalente de semitons.

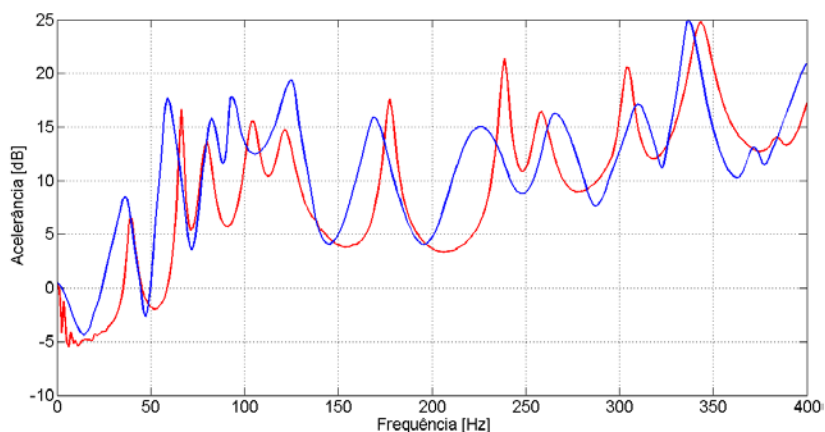


Figura 5.1 – Comparação entre a média das FRFs experimentais (em vermelho) e numérica (em azul) do tampo de abeto.

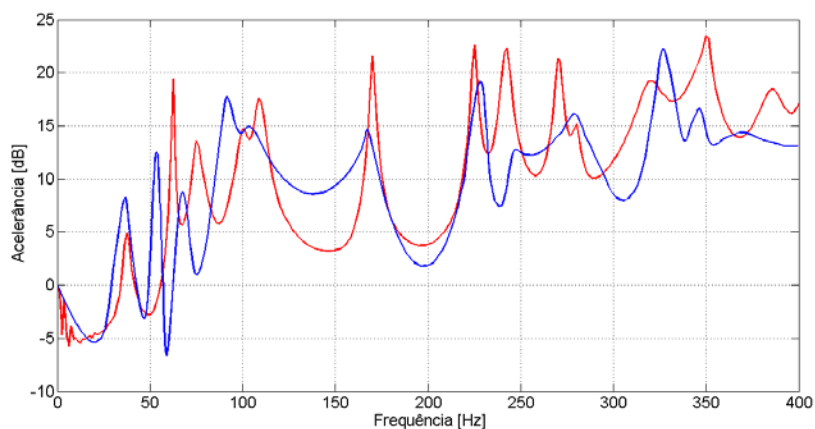


Figura 5.2 – Comparação entre a média das FRFs experimentais (em vermelho) e numérica (em azul) do tampo de cedro.

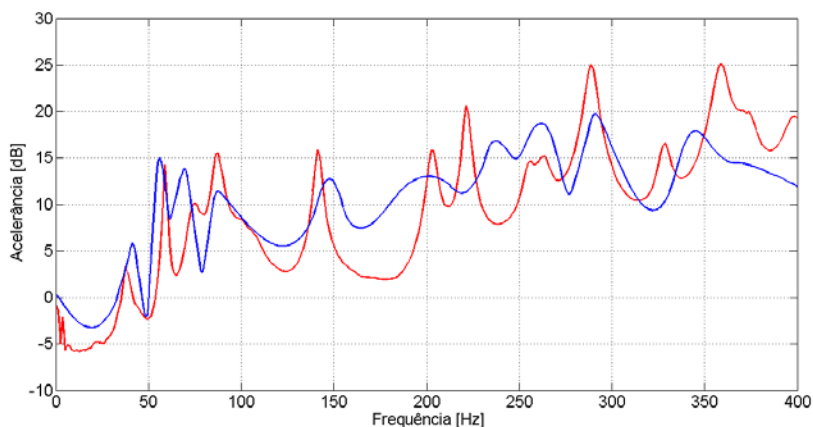


Figura 5.3 – Comparação entre a média das FRFs experimentais (em vermelho) e numérica (em azul) do tampo de marupá.

Um dos critérios de comparação inicial foi o cálculo dos erros percentuais dos valores absolutos das frequências naturais para os modos relacionados entre os resultados numéricos e experimentais. Estes são apresentados na Tabela 5.1 em valores percentuais (%). Observando-se os erros máximos em cada frequência, pode-se observar que o modelo numérico representa o comportamento do tampo do violão com um erro relativamente pequeno, sendo o maior equivalente a 13,6 % para a 2ª frequência natural simulada (abeto 59,35 Hz). As diferenças encontradas podem ser justificadas pelas aproximações e simplificações admitidas durante a etapa de modelagem como, por exemplo, as características de colagem entre o tampo e as barras harmônicas não terem sido consideradas no modelo. Outra possível fonte de erros foram as incertezas na determinação das propriedades das madeiras.

Tabela 5.1- Erros percentuais das frequências naturais numéricas em relação aos valores experimentais para os modos relacionados.

	Erro percentual (%)							
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo 7	Modo 8
<b>Abeto</b>	-8,9	-13,6	4,0	-11,1	2,1	-4,9	-5,6	3,1
<b>Cedro</b>	-1,2	-10,5	-11,0	-8,8	-5,4	-2,2	1,4	2,0
<b>Marupá</b>	9,1	-5,0	-6,7	-0,4	10,6	3,3	6,9	2,5

O amortecimento representado pelo fator de qualidade  $Q$  é amplamente utilizado no campo da acústica musical para descrever uma relação de qualidade associada a cada modo de ressonância e é calculado a partir da frequência ressonante fundamental e das frequências vizinhas, onde a amplitude da grandeza medida é 0,707 (3 dB abaixo) da amplitude máxima. Segundo Henrique [Henrique, 2007], o fator de qualidade constitui uma maneira alternativa de quantificar o amortecimento de um oscilador, e também pode ser encarado como um fator de amplificação definido pela relação entre a amplitude de deslocamento na frequência de ressonância e o deslocamento estático. É calculado como o inverso do fator de perda,  $\eta$ . Os resultados para cada modo obtido experimentalmente (até o 8º modo) são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Fator de qualidade ( $Q$ ) para os modos experimentais.

	Fator de qualidade $Q$ (adimensional)							
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo 7	Modo 8
<b>Abeto</b>	8,1	34,7	12,4	14,2	12,4	34,9	64,3	65,1
<b>Cedro</b>	5,9	19,6	10,1	15,7	16,2	73,4	77,4	51,7
<b>Marupá</b>	6,5	13,3	12,1	14,6	12,7	38,7	34,7	34,6

Os fatores de qualidade das três ressonâncias mais baixas, as quais são consideradas as mais importantes para a caracterização do som do instrumento [French, 2009], são maiores para o abeto, apesar de seus resultados serem baixos e não diferirem muito das demais espécies. O cedro apresenta um fator de qualidade maior nas ressonâncias de modos mais elevados, o que significaria dizer que tais ressonâncias têm um menor amortecimento. O marupá apresenta um maior equilíbrio entre os fatores de qualidade dos modos analisados. Caso se considere um alto fator de qualidade como um dos critérios para a qualidade da madeira utilizada na construção de instrumentos musicais, pode-se dizer que em baixas frequências (até o quinto modo) nenhuma das espécies apresentou um bom resultado.

Os modos superiores (acima de 400 Hz) não foram incluídos na análise por meio do fator de qualidade, devido à alta densidade modal, que dificulta a associação individual modo a modo. Para ilustrar as diferenças do comportamento vibratório nos tampos até a região de altas frequências, a Figura 5.4 apresenta a curva média das FRFs

(acelerâncias), filtradas em bandas de 1/3 de oitava, obtidas experimentalmente para as três espécies até 2000 Hz.

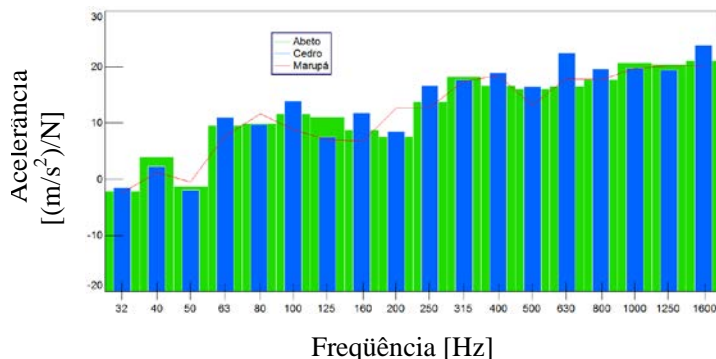


Figura 5.4 – Aceleração experimental em faixa ampla de frequências, filtrada em 1/3 de oitava.

Uma vez que a geometria e o método de ensaio foram idênticos nos três ensaios, as diferenças de resposta se devem às propriedades particulares de cada espécie de madeira. A característica mais importante a se notar está nas amplitudes das curvas de aceleração, as quais apesar de apresentar diferenças para a maioria das frequências, acompanham uma mesma tendência ao longo do espectro. Cabe agora uma análise mais detalhada, relacionando cada modo identificado através do padrão vibracional observado, conforme descrito no Item 5.2.

## 5.2 Formas modais

Os resultados experimentais das formas modais são apresentados ao longo deste item em comparação com aqueles obtidos através de simulação numérica por elementos finitos, usando as propriedades das respectivas espécies de madeira. Para todas as figuras relacionadas ao tempo livre do violão, será usado o mesmo sistema de coordenadas, conforme ilustra a Figura 5.5.



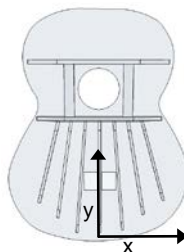


Figura 5.5 – Sistema de coordenadas usado na comparação dos modos.

Nas Figuras 5.6 a 5.13 podem-se observar os padrões de vibração dos oito primeiros modos naturais dos tampos analisados em condições de contorno livre e as respectivas frequências naturais. Apesar dos dados originais das medições terem sido inicialmente processados com o software *Star7*, disponível no Laboratório de Acústica Musical do Instituto Politécnico do Porto, estas figuras apresentadas a seguir foram obtidas a partir do software de análise modal *LMS TestLab*, disponível no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC.

As regiões nodais são representadas por áreas de tonalidades azuladas mais escuras. As demais cores, que variam entre azul claro, verde e vermelho representam amplitudes de deslocamentos relativos. Os modos são normalizados individualmente e não há um nível de referência comum entre eles. Portanto, estas escalas apenas refletem a amplitude das diferentes áreas do tampo para o modo de vibração em questão.

O modo #1 corresponde ao modo fundamental de torção do tampo e é apresentado na Figura 5.6.

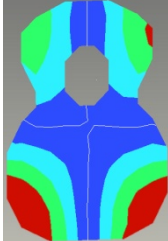
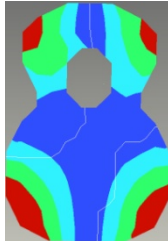
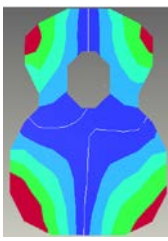
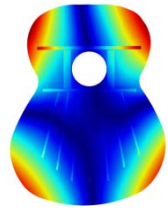
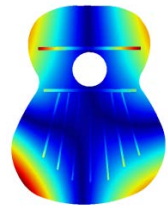
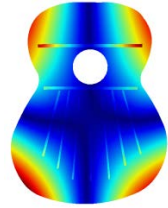
Tampo	Abeto	Cedro	Marupá
Experimental			
freq[Hz]	39,99	37,27	37,87
Numérico			
freq[Hz]	36,42	36,82	41,32

Figura 5.6 – Modo #1. Padrões de vibração do modo natural (1,1) dos tampo livres analisados.

Observa-se na Figura 5.6 que a forma do primeiro modo de vibração é bastante similar ao modo obtido numericamente. Nota-se um maior deslocamento na parte inferior do tampo, por causa da influência de rigidez imposta pelas barras transversais.

Para cada uma das espécies analisadas isoladamente, os módulos de cisalhamento  $G_{xz}$  e  $G_{yx}$  apresentam valores próximos, sendo  $G_{yz}$  muito maior do que os anteriores (cerca de 20 vezes). O modelo numérico permitiu uma variação na faixa de valores para verificar a sensibilidade do modelo às propriedades mecânicas estudadas e notou-se que variações em  $G_{xz}$  e  $G_{yz}$  não produzem qualquer alteração visível nas linhas nodais, sendo as frequências naturais ligeiramente afetadas (cerca de 1%), apenas para os modos mais altos. No entanto, variações em  $G_{yx}$  resultaram em modificações consideráveis (cerca de 10%) nos valores das frequências dos modos, embora os padrões de vibração não tenham se alterado. Este é o único parâmetro que afeta o primeiro modo e esse fato parece coerente, levando-se em conta o caráter de torção deste modo.

Sendo assim, as frequências naturais calculadas pelo método numérico usando os valores médios calculados são fortemente

influenciadas pelo módulo de cisalhamento  $G_{yx}$ , que varia de 2,53 GPa a 5,39 GPa entre as espécies.

O modo #2 corresponde ao modo fundamental de flexão transversal, e é mostrado na Figura 5.7.

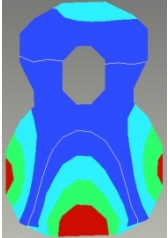
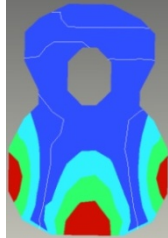
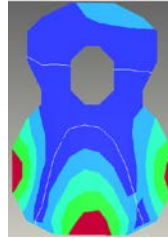
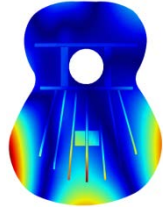
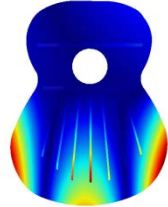
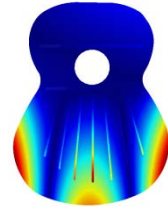
Tampo	Abeto	Cedro	Marupá
Experimental			
freq[Hz]	66,39	62,30	59,06
Numérico			
freq[Hz]	59,35	53,9	56,09

Figura 5.7 – Modo #2. Padrões de vibração do modo natural (2,1) dos tampos livres analisados.

Observa-se grande semelhança entre a forma dos modos, porém com uma maior diferença (erro médio maior que 10%) entre os valores experimentais e numéricos. Em uma análise de sensibilidade, notou-se que a forma modal e frequência natural são fortemente influenciados pelo módulo Young  $E_x$ , que varia de 0,25 GPa a 0,84 GPa entre as espécies. Nota-se forte influência das barras transversais, observando a linha nodal na altura da boca, impedindo quase qualquer movimento acima.

O modo #3 é o modo fundamental de flexão longitudinal, e é apresentado na Figura 5.8.

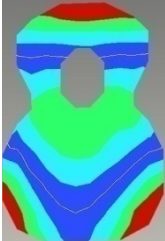
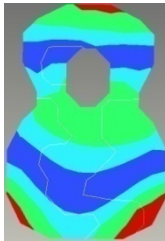
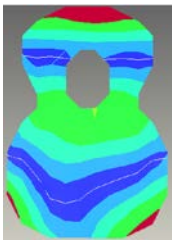
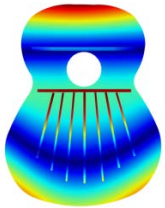
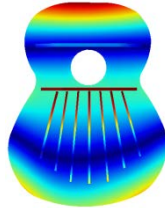
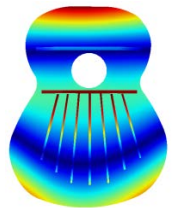
Tampo	Abeto	Cedro	Marupá
Experimental			
freq[Hz]	79,30	75,24	74,52
Numérico			
freq[Hz]	82,46	66,94	69,50

Figura 5.8 – Modo #3. Padrões de vibração do modo natural (0,2) dos tampos livres analisados.

Observa-se uma razoável concordância entre os modos. Na região inferior, nota-se uma combinação de flexão longitudinal e transversal, mais acentuada nos resultados experimentais. A análise de sensibilidade, variando-se o valor dos parâmetros no modelo numérico, revelou que o módulo de elasticidade  $E_y$  tem influência predominante na região superior, enquanto na inferior este modo é influenciado por ambos os módulos de Young.

A Figura 5.9 mostra o modo #4 de vibração, que corresponde ao segundo modo de torção.

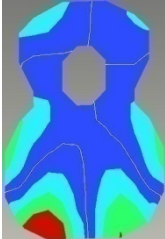
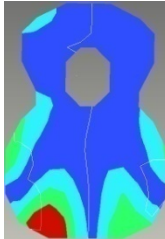
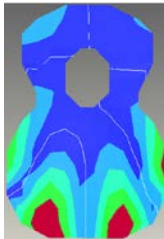
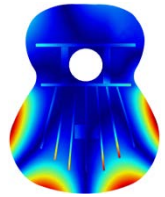
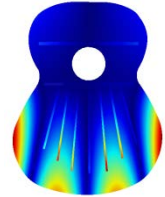
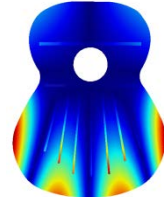
Tampo	Abeto	Cedro	Marupá
Experimental			
freq[Hz]	104,9	99,57	87,36
Numérico			
freq[Hz]	93,28	90,83	87,05

Figura 5.9 – Modo #4. Padrões de vibração do modo natural (1,2) dos tampos livres analisados.

A partir da variação dos parâmetros de entrada no modelo numérico, foi observado na parte inferior do tampo a influência de  $E_x$  na inclinação da linha nodal para direção perpendicular ao veio da madeira nas extremidades.

A Figura 5.10 mostra o modo #5 de vibração, que corresponde ao segundo modo de flexão transversal.

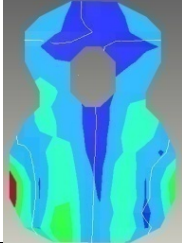
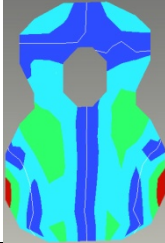
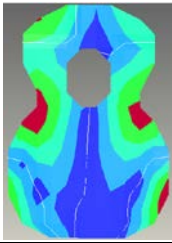
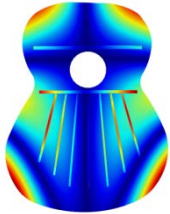
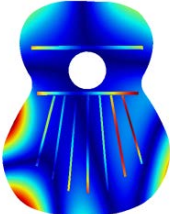
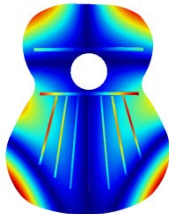
Tampo	Abeto	Cedro	Marupá
Experimental			
freq[Hz]	121,7	108,76	101,86
Numérico			
freq[Hz]	124,27	102,86	112,69

Figura 5.10 – Modo #5. Padrões de vibração do modo natural (3,1) dos tampos livres analisados.

Observa-se uma boa concordância entre as formas modais e também entre as frequências naturais experimentais e numéricas. A zona superior apresenta uma leve torção. Pode-se observar neste padrão vibratório e também nos outros relacionados aos movimentos transversais, que o tampo de cedro apresenta uma flexibilidade maior nessa direção.

O modo #6 corresponde ao terceiro modo de flexão transversal da parte inferior, e é apresentado na Figura 5.11.

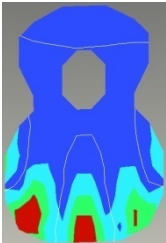
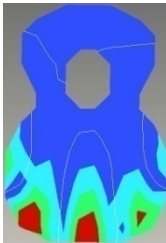
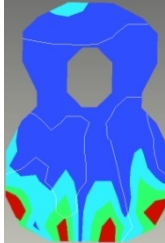
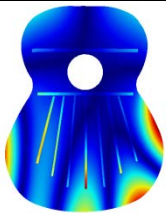
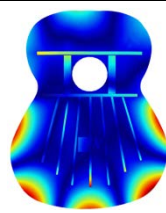
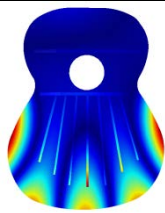
Tampo	Abeto	Cedro	Marupá
Experimental			
freq[Hz]	177,55	170,5	142,45
Numérico			
freq[Hz]	168,85	166,61	147,17

Figura 5.11 – Modo #6. Padrões de vibração do modo natural (4,1) dos tampos livres analisados.

É possível verificar uma boa concordância entre as formas modais e uma razoável proximidade entre as frequências naturais experimentais e numéricas.

A Figura 5.12 mostra o modo #7 de vibração, que corresponde ao segundo modo de flexão longitudinal.

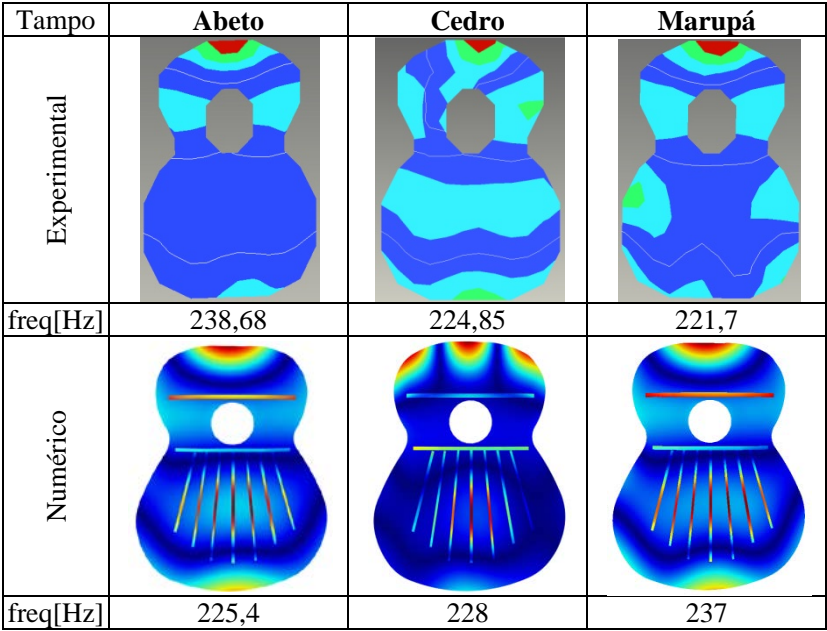


Figura 5.12 – Modo #7. Padrões de vibração do modo natural (0,3) dos tampos livres analisados.

Pode-se observar no tampo de cedro que o fato de seu módulo de elasticidade transversal ser muito menor que o das outras duas espécies, faz com que a extremidade superior, que não possui barramento, apresente também um padrão de flexão transversal. Tal fato é verificado na baixa correlação que este modo apresenta nos padrões MAC apresentados na Figura 5.15.

O modo #8 corresponde ao terceiro modo de torção do tampo e é apresentado na Figura 5.13.



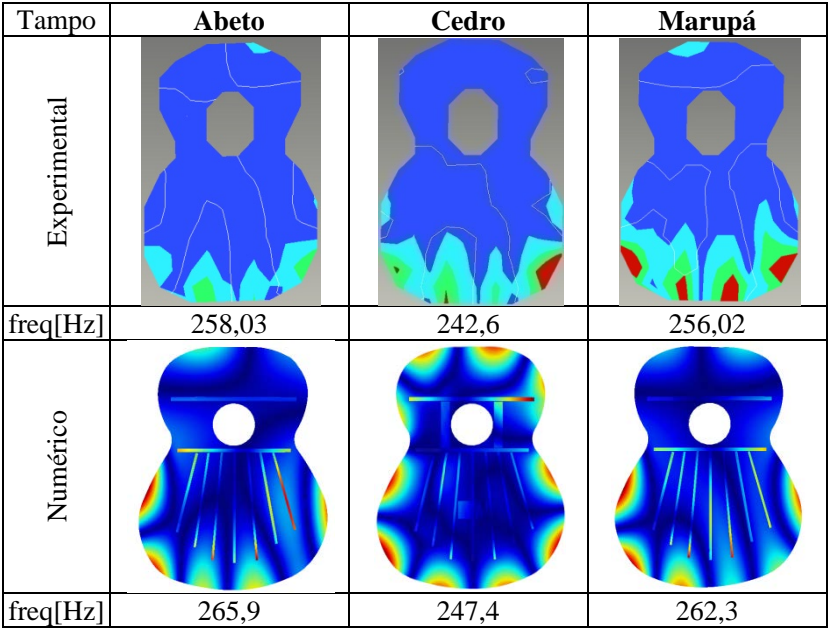


Figura 5.13 – Modo #8. Padrões de vibração do modo natural (1,3) dos tampos livres analisados.

Ao longo dos padrões vibratórios, é possível notar que o tampo de marupá apresenta formas muito mais similares ao tampo de abeto que em relação ao feito de cedro. Tal característica representa um importante resultado, pois o abeto tem sido a madeira de referência para a construção de instrumentos de corda por muitas gerações. No entanto, para confirmar essas suposições, são necessárias formas alternativas de análise.

5.3 Critério MAC

A função conhecida como critério de confiança modal (MAC, *Modal Assurance Criterion*) foi outro recurso utilizado na validação dos resultados. Seu objetivo é fornecer uma medida da consistência na determinação dos modos de vibração, proporcionando um fator de confiança adicional na avaliação dos modos de vibração.

Este recurso pode ser utilizado para investigar a eficácia da estimativa dos modos dentro de um mesmo modelo modal

(AUTOMAC) ou entre dois modelos diferentes (MAC). Ao comparar formas modais, os valores de MAC para os modos correspondentes (diagonal da matriz) devem convergir para 100%, sendo uma indicação de que os vetores modais são consistentes. A Figura 5.14 apresenta o resultado do cálculo do AUTOMAC para cada espécie, sendo usada a forma gráfica em duas dimensões para tal.

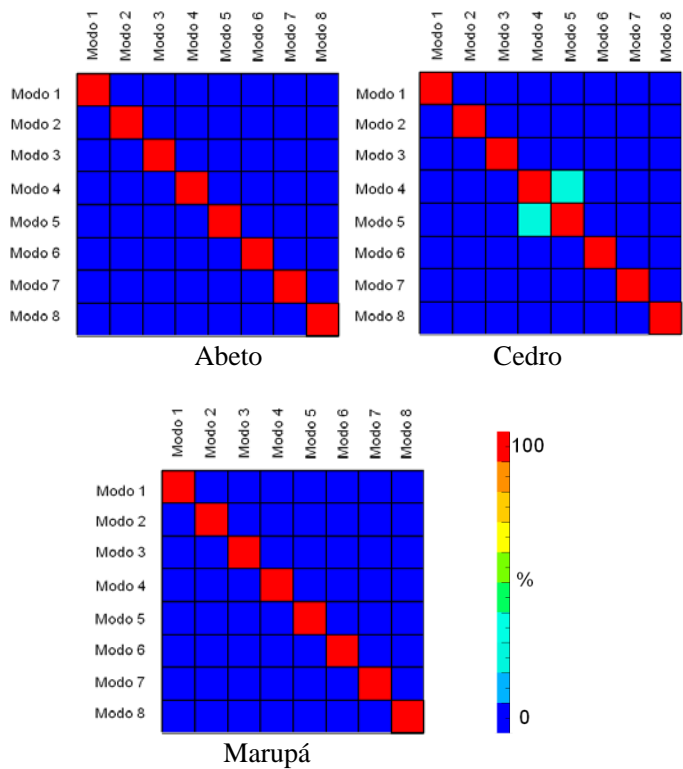


Figura 5.14 – AUTOMAC para as três espécies.

A partir dessas representações AUTOMAC pode-se observar algumas características: (i) todos os valores diagonais são idealmente 100%, por definição, pois cada modo de vibração deve estar perfeitamente correlacionado ele próprio; (ii) a matriz AUTOMAC é simétrica, e (iii) há a ocorrência de termos não-nulos fora da diagonal, o que significa que alguns dos modos apresentam um grau de correlação com os outros, um resultado que não é esperado de imediato, uma vez que supõe-se que os modos são ortogonais. Isto pode ocorrer devido à propriedade de ortogonalidade ser apenas aplicável quando todos os graus de liberdade estão incluídos no cálculo. É necessário incluir graus de liberdade suficientes para assegurar a discriminação eficaz entre os vários modos.

Também é interessante utilizar o recurso MAC para comparar a correlação dos modos obtidos experimentalmente entre as espécies, já que as espécies abeto e cedro são usadas como referência neste trabalho para a validação das propriedades do marupá. A Figura 5.15 apresenta os resultados do MAC calculados entre as espécies em estudo, de duas a duas.

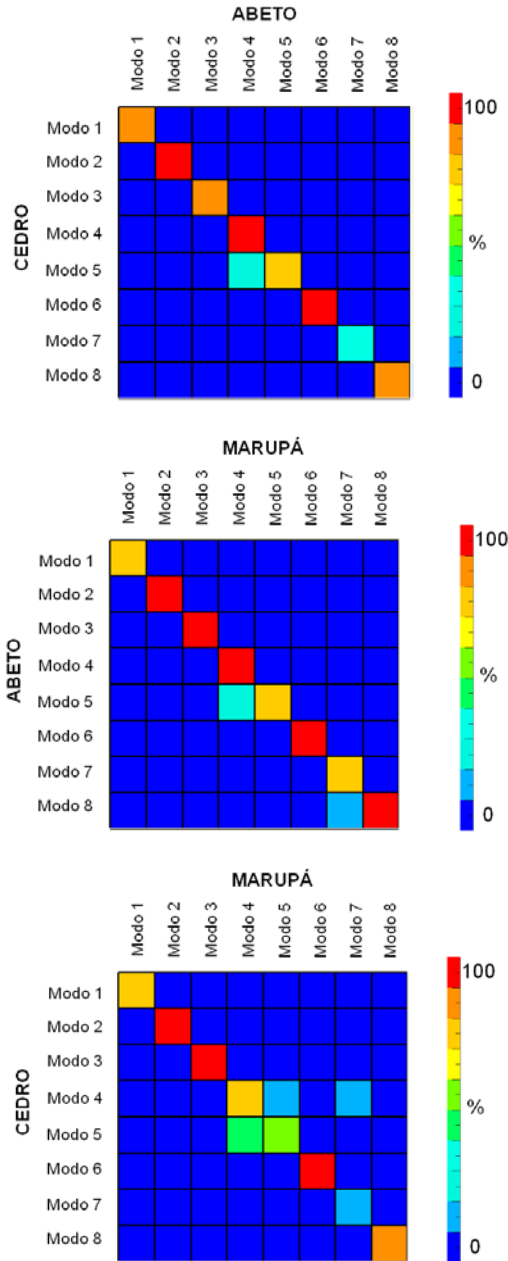


Figura 5.15 – MAC comparativo entre as espécies.

Nota-se que o tampo de marupá se correlaciona melhor com o tampo de abeto do que com o de cedro, pois a diagonal desta análise cruzada apresenta mais termos próximos ou iguais a 100%.

É importante ressaltar que, para garantir a coerência na associação dos modos através desta análise, é essencial uma identificação visual prévia de cada modo com o seu homólogo (conforme foi feito no Item 5.2), para fornecer um conjunto de pares de modos que possam ser correlacionados.

## **5.4 Considerações sobre os resultados**

Neste capítulo, foram utilizados alguns métodos para a comparação e correlação quantitativa entre as propriedades dinâmicas de um tampo de violão previstas por um modelo numérico e os medidos em um experimento de análise modal. A partir de tais procedimentos de correlação, é possível determinar os pares de modo correlacionados e fornecer algumas indicações iniciais da localização de erros.

Nas FRFs analisadas, dentro da faixa de frequências que abrange os primeiros oito modos obtidos experimentalmente, observou-se boa semelhança no comportamento modal entre os tampos fabricados com os três materiais, o que se comprovou com a utilização da representação MAC.

Após a comparação dos resultados experimentais das três espécies, observou-se que até o oitavo modo, o abeto apresenta frequências ligeiramente mais altas para os mesmos padrões vibratórios identificados.

Foi feita uma tentativa de estabelecer uma relação entre as frequências dos modos que apresentam um caráter vibracional semelhante: torção, flexão longitudinal e flexão transversal. Esta se mostrou ser uma boa estratégia para a comparação direta entre o caráter vibracional no domínio da frequência.

Pode-se observar uma tendência na distribuição das frequências de vibração experimentais. Observando-se a faixa de frequência até 400 Hz, podem-se distinguir três zonas, sendo verificado um comportamento semelhante até o oitavo modo de vibração nas três espécies.

A primeira região, que se estende até 80 Hz, onde aparecem os três modos iniciais, sendo modos fundamentais de torção, flexão transversal e flexão longitudinal. A segunda zona é uma faixa de 90 Hz a 260 Hz, que caracteriza-se pela presença dos modos que podem ser considerados como uma evolução dos modos descritos na primeira zona. Finalmente, a terceira zona dos modos mais altos, onde não foi possível

encontrar uma relação que garantisse uma coerência na comparação direta.

Uma curiosidade é que o tampo de marupá é o único cujas frequências dos primeiros cinco modos correlacionariam com a série harmônica, com uma relação de 1:2:3:4:5, aproximadamente.

Os fatores de qualidade (Q) de quase todas as ressonâncias são maiores no tampo de abeto, sendo superado pelo cedro e pelo marupá apenas em algumas frequências médias. Tendo em conta que um dos critérios para a determinação da qualidade das madeiras usadas na construção de instrumentos musicais é um elevado fator de qualidade, pode-se justificar porque o abeto tem sido uma das espécies mais utilizadas tradicionalmente. No entanto, o marupá apresentou uma convergência nos resultados em relação ao abeto, tanto nos valores das frequências dos modos como nos padrões vibracionais.

Verificou-se que os parâmetros mais influentes para as frequências e a forma dos modos são os módulos de Young longitudinal e transversal. A densidade mostrou ser um parâmetro que tem impacto nos valores de frequência das ressonâncias, embora não altere o padrão dos modos. Os módulos de cisalhamento não afetaram os resultados de forma significativa, exceto no caso  $G_{yx}$ . Finalmente, o coeficiente de Poisson praticamente não mostrou qualquer influência sobre os resultados, ao longo de uma faixa ampla de variações. A partir destas conclusões, parece claro que a determinação com precisão da densidade, dos módulos de Young (longitudinal e transversal), do amortecimento e de  $G_{yx}$  para cada amostra é suficiente para um estudo quantitativo de comportamento vibratório de madeiras em tampos de violão. Os demais parâmetros podem ser determinados usando-se valores médios de literatura sem provocar desvios significativos nos resultados.

## 6 QUALIDADE DO INSTRUMENTO FINAL

A qualidade de um violão está relacionada a diversos fatores que, de forma conjunta, determinam a eficiência com que as vibrações produzidas pelas cordas dedilhadas são convertidas no som resultante.

Garantir a qualidade de um instrumento, de forma definitiva, a partir da escolha de determinados tipos de madeira não é razoável, pois além dos outros materiais usados para beneficiar a matéria-prima, como colas e vernizes, as técnicas construtivas e condições ambientais são importantes no resultado final do projeto.

A madeira como matéria-prima não está apenas relacionada à escolha de determinadas espécies, mas também às condições em que foi extraída e armazenada. O tipo de corte, a idade e a umidade são, por exemplo, fundamentais para sua utilização como “madeira ressonante”.

As técnicas construtivas envolvem o projeto adotado pelo fabricante, as dimensões e espessuras, o barramento harmônico, tipo de cola e vernizes, entre outras. A experiência do construtor, bem como as tecnologias e ferramentas disponíveis são também determinantes nesse processo.

As cordas também desempenham um papel crucial na qualidade sonora do instrumento musical [Marques et al, 2012]. Ao longo do tempo de uso do instrumento, as cordas tensionadas envelhecem, até ao ponto de alcançar um estado em que a tocabilidade, ou seja, a facilidade que o instrumento oferece para ser tocado, chega a ser comprometida. As propriedades das cordas podem ser afetadas por vários fatores, tais como a oxidação causada por condições climáticas locais, ou mesmo pela transpiração dos dedos e pelo esforço repetitivo da digitação contra os trastes.

Um dos objetivos deste estudo é encontrar correlações entre parâmetros objetivos mensuráveis e propriedades mecânicas intrínsecas do material usado para a manufatura do elemento mais diretamente relacionado à radiação sonora do violão, o tampo superior. Por isso, este componente foi analisado separadamente do restante do instrumento. Para tal, foi essencial manter o processo de construção controlado, para garantir que o que está sendo comparado é a espécie, ou seja, o material usado.

Costuma-se declarar que a “madeira ressonante” do abeto é caracterizada naturalmente por um módulo de elasticidade axial alto e anisotropia muito elevada, e baixa densidade e fator de perda por amortecimento. Isto tem consequências evidentes sobre o comportamento vibratório de estruturas tipo vigas e placas, no entanto,

não se pode facilmente assumir diretamente disto uma noção de “qualidade musical”. No caso de xilofones, poderiam ser encontradas correlações claras entre as propriedades dos materiais e a percepção sonora [Aramaki et al, 2007], mas a complexidade envolvida na construção e estrutura de instrumentos de corda torna essa tarefa mais difícil.

Diversos testes de audição e uso de violões com diferentes propriedades relacionadas à madeira já foram realizados [Meyer, 1983]. No entanto, vários não apresentaram resultados conclusivos, enquanto outros, se o fizeram, suas conclusões nem sempre são comparáveis com outros resultados. Isto sugere que talvez a questão deva ser abordada por etapas.

Como um primeiro passo sugere-se avaliar a relação entre as propriedades dos materiais e o julgamento da madeira pelos próprios fabricantes de instrumentos. Embora as propriedades das “madeiras ressonantes” sejam claramente diferenciadas, materiais classificados em qualidade como “bom” e “médio” freqüentemente se sobrepõem em intervalos de propriedades.

Um estudo recente sugere que a classificação de madeira pré-selecionada por fabricantes de violinos se baseia principalmente na densidade e parâmetros estéticos, e muito pouco em propriedades mecânicas [Buksnowitz et al, 2007]. Dada a complexidade do sistema fonte-meio-receptor e das relações entre parâmetros físicos e questões culturais, observa-se que uma reavaliação deste problema através de metodologias interdisciplinares pode ser bastante esclarecedora.

## **6.1 Critérios de avaliação de qualidade**

A partir de uma análise do comportamento estrutural do instrumento montado, é possível avaliar alguns parâmetros que podem ser úteis para o julgamento de qualidade.

O violão avaliado neste trabalho foi doado pela Oficina Escola de Luteria da Amazônia (OELA). Trata-se de um violão clássico, de seis cordas, fabricado a partir de quatro espécies alternativas brasileiras, o marupá no tampo, tauari vermelho para o fundo e laterais, o breu branco no braço e coração de negro para a escala e cavalete, conforme mostrado na Figura 6.1.





Figura 6.1 – Construção do violão clássico de madeiras amazônicas na oficina da OEELA.

## 6.2 Análise modal experimental do tampo montado

A fim de analisar o comportamento do tampo do violão feito em madeira amazônica em uma situação real de funcionamento, um tampo construído em marupá foi montado em um violão completo, citado no Item 6.1, sendo esse analisado experimentalmente. O procedimento foi similar ao usado nos tampos livres, o qual consiste em aplicar uma excitação impulsiva em todos os pontos da estrutura por meio de martelo de impacto e a resposta obtida por meio de acelerômetros. O suporte experimental foi montado de acordo com o esquema da Figura 6.2.

Para garantir que o sistema funcionasse em condições usuais, ou seja, proporcionar a carga estática no cavalete colado ao tampo, as seis cordas foram tensionadas na afinação padrão e posteriormente abafadas (imobilizadas) por meio de um pedaço de fio de borracha, entrelaçado transversalmente.

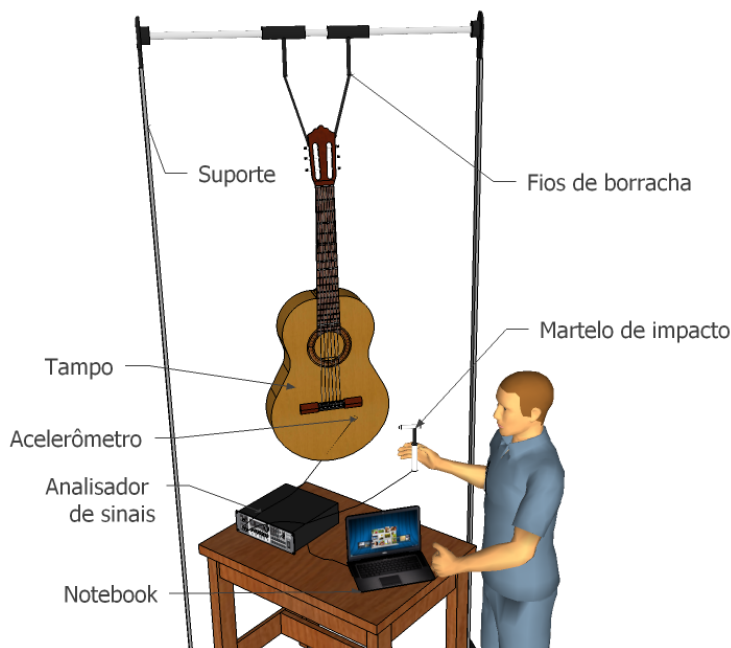


Figura 6.2 – Bancada experimental para o tampo montado.

### 6.2.1 Procedimentos adotados

A faixa de frequência considerada foi de 20 Hz a 2000 Hz e o tempo de amostragem de  $t = 1,25$  ms, com resolução em frequência  $\Delta f = 0,5$  Hz. Cada resposta foi obtida a partir da média de três medições, de forma a minimizar erros.

A fixação do acelerômetro na estrutura foi feita com cera de abelha. O violão foi testado em salas climatizadas, com temperatura na faixa de  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa entre 45% e 55%.

O violão foi suspenso livremente por um dispositivo feito de cabos elásticos fixados em uma estrutura rígida (vigas metálicas) ligada às paredes. O sinal de entrada foi medido com um transdutor de força embutido no próprio martelo de impacto e as vibrações de cada estrutura (sinal de saída) foram capturadas com dois acelerômetros (medição em direção z). O registro e processamento dos sinais foram realizados por meio de um sistema de medição ligado a um computador pessoal. Todos esses equipamentos estão especificados na Tabela 4.1 (Capítulo 4).

O tampo do violão em estudo foi dividido em uma malha de pontos de 3 cm x 3 cm, resultando em 154 pontos distribuídos simetricamente em torno da linha de centro, em uma configuração de rede. Cada um dos pontos recebeu 3 impactos, resultando em uma média por nó. Todos os pontos de medição foram identificados de acordo com o eixo ortogonal definido da seguinte forma: X: direção positiva das cordas mais agudas para as cordas de baixa frequência; Y: direção positiva a partir do cavalete no sentido do braço; Z: direção positiva do fundo para o tampo.

As posições dos pontos fixos de resposta, destacados na Figura 4.10 (Capítulo 4) por meio de setas largas, foram escolhidas de forma a representar comportamentos vibratórios de regiões importantes na vibração do tampo: próximo à borda do cavalete (ponto 125) e na região de transição de rigidez imposta pelas barras de reforço transversais (ponto 69).

## 6.2.2 Resultados da análise modal experimental do tampo montado

Os modos de vibração do tampo são representados pelos padrões visuais resultantes da distribuição de regiões nodais mais significativas na superfície da estrutura. A cada faixa de frequência, o sistema apresenta nós e ventres em diferentes configurações espaciais, resultando em padrões visuais distintos.

Nesta pesquisa utilizou-se a análise modal do comportamento dinâmico do tampo do violão, obtendo vários resultados: as frequências e as respectivas formas modais dos primeiros 6 modos normais de vibração, que são representados através de diagramas (Figura 6.3).

Com o aumento da frequência, os padrões visuais se tornam mais complexos. Tal fato pode ser notado tanto nos tampos livres como montados. No caso, o tampo montado no violão responde em seus modos naturais de vibração, que nestas condições estruturais estão acoplados ao volume de ar interior e ao fundo e laterais da caixa acústica do instrumento, por isso diferem dos modos já apresentados para tampos livres.

A Figura 6.3 mostra os principais modos de baixa frequência do tampo de violão de marupá montado, designados como (1,1); (2,1); (1,2); etc, de acordo com as formas modais. Cada modo é associado a um pico na resposta em frequência medida com acelerômetros. Neste caso, a excitação usada na estrutura foi uma força aplicada com um martelo de impacto perpendicularmente a cada ponto da malha determinada com a mesma configuração de malha utilizada nos tampos livres.

As formas modais são determinadas pelas condições de contorno e dimensões do projeto construtivo, incluindo a disposição das barras harmônicas. Já as frequências naturais e as características da função resposta em frequência, como os picos e fatores de qualidade, são determinadas de forma mais direta pela rigidez do tampo que, por sua vez, depende das propriedades mecânicas da madeira em combinação com as espessuras aplicadas.

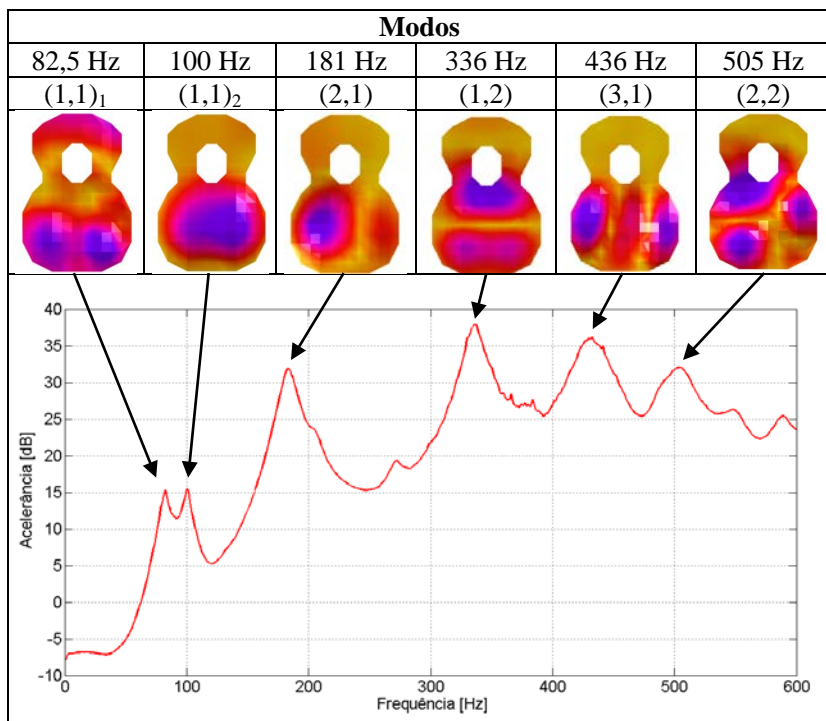


Figura 6.3 – Principais modos de baixa frequência do tampo de violão de marupá montado.

Um exemplo de uma FRF típica de um violão de tampo de abeto é apresentado na Figura 6.4 [French, 2009] através da curva azul tracejada. Neste mesmo gráfico, é apresentada em vermelho contínuo a FRF do violão de tampo de marupá medido neste trabalho, a fim de proporcionar uma comparação.

A curva do tampo de abeto pode ser caracterizada inicialmente por três picos de ressonância distintos, em 97,86 Hz, 181,1 Hz e 325,3 Hz. Na curva do tampo de marupá, os picos de ressonância dupla,

ligeiramente abaixo de 100 Hz, são também facilmente reconhecíveis, seguidos por outros 4 modos comparáveis aos do tampo de abeto. Para frequências mais altas as duas curvas são bastante diferentes.

Para permitir que uma correlação entre as características de ressonância e a avaliação subjetiva seja viável, foram determinadas algumas características destas FRFs sob a forma de valores numéricos. São elas:

- a frequência e o fator Q das primeiras cinco ressonâncias, apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2;
- a distância entre as frequências de pico e da frequência da nota mais próxima, em *cents*<sup>7</sup>, apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2;
- relação do intervalo em *Hertz* entre os modos (2,1) e (1,1), sendo esta relação para o tampo de abeto 1,85 e para o tampo de marupá 1,81. De acordo com as investigações realizadas pela Letowski e Bartz [Letowski e Bartz, 1971], em 1971, este intervalo deve ser o mais próximo possível de uma oitava, ou seja, deve apresentar uma relação de 2.

Tabela 6.1- Frequência, fator Q e distância da nota mais próxima das primeiras seis ressonâncias para o violão de tampo de marupá.

Modo	Freq.[Hz]	Fator Q	Nota próxima	Freq.[Hz]	Dif.[cents]
(1,1) <sub>1</sub>	82,5	8,3	E <sup>2</sup>	82,4	-2,1
(1,1) <sub>2</sub>	100	13,5	G <sup>2</sup>	97,9	-36,74
(2,1)	181	15,8	F <sup>3</sup>	174,6	-62,3
(1,2)	336	21,0	E <sup>4</sup>	329,6	-22,8
(3,1)	436	16,6	A <sup>4</sup>	440	15,81
(2,2)	505	25,3	B <sup>4</sup>	493,88	-38,5

<sup>7</sup> O cent é uma unidade logarítmica utilizada para quantificar intervalos musicais em um sistema de referência que divide a oitava em 12 semitons de 100 cents cada. Normalmente, os cents são usados para medir intervalos finitos extremamente pequenos, ou para comparar os intervalos musicais em diferentes sistemas de afinação. É difícil estabelecer quantos cents são perceptíveis para a audição humana, esta precisão varia muito de pessoa para pessoa. Pesquisas sugerem que os seres humanos podem distinguir a partir de uma diferença de cerca de 5-6 cents [Loeffler, 2006], sendo que o limiar perceptível varia também em função da frequência, a amplitude e o timbre. Outras pesquisas afirmam que adultos normais são capazes de reconhecer as diferenças de afinação de 25 cents de forma bastante confiável [Peretz e Hyde, 2003].

Tabela 6.2- Frequência, fator Q e distância da nota mais próxima das primeiras cinco ressonâncias para o violão de tampo de abeto.

Modo	Freq.[Hz]	Fator Q	Nota próxima	Freq.[Hz]	Dif.[cents]
(1,1)	97,86	14,6	G <sup>2</sup>	97,9	0,7
(2,1)	181,1	16,1	F <sup>3</sup>	174,6	-63,2
(1,2)	325,3	27,6	E <sup>4</sup>	329,6	22,7
(3,1)	417,5	26,1	A <sup>4</sup>	440	90,8
(2,2)	476,1	47,6	B <sup>4</sup>	493,88	63,5

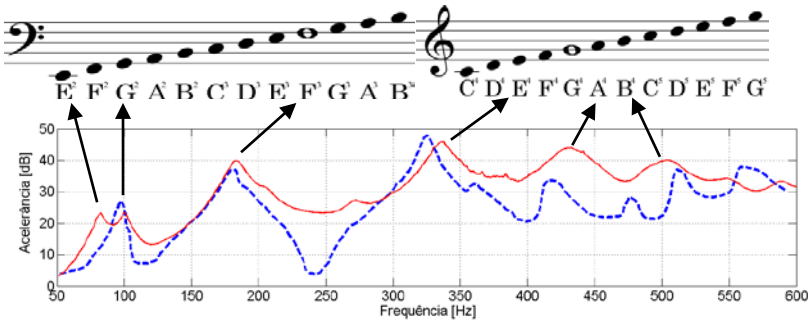


Figura 6.4 – FRF típica (baixa frequência) de um violão de tampo de abeto (azul tracejado) em comparação com o tampo de marupá analisado (vermelho contínuo). Picos de ressonância associados a notas no pentagrama.

A distância da primeira frequência de ressonância (1,1) em relação à nota mais próxima da escala é considerada um fator importante, pois se a ressonância coincide com a nota, essa é amplificada e destoa do padrão sonoro das notas adjacentes. Por esta razão, a ressonância deve, se possível, situar-se a uma distância maior que 25 cents da frequência da nota mais próxima. Para o tampo de marupá este é o caso mais crítico, pois o modo (1,1)<sub>1</sub> apresenta apenas 2,1 cents de diferença da nota E<sup>2</sup>, que corresponde à sexta corda solta do violão. O violão de tampo de abeto não apresenta ressonância associada a esta nota. No tampo de marupá, nota-se que este modo se encontra dividido em dois picos, em função do comportamento dinâmico complexo da estrutura e sua interação com a cavidade de ar interna. Sendo assim, o modo fundamental (1,1), acopla com o pistão de ar que se forma na cavidade da boca, gerando uma ressonância dupla, em que o pistão de ar se move em antifase ao movimento fundamental do tampo, ou ambos se deslocam em fase [Caldersmith, 1995; Ezcurra et al, 2005]. O resultado deste efeito é perceptível na execução das notas englobadas nesta faixa

de frequência, pois embora o tampo não irradie de forma eficiente neste modo, a cavidade da boca contribui significativamente para a radiação frontal do instrumento em baixa frequência dependendo da proximidade do cavalete da linha nodal do modo (1,1).

A segunda ressonância principal (2,1), a qual se situa próxima a 180 Hz, também deve estar a certa distância da nota mais próxima. Mas como a segunda ressonância é mais amortecida que a primeira, e como nesta frequência os mesmos desvios em *cents* resultam em uma frequência de batimento aproximadamente igual ao dobro do caso anterior, uma diferença com a nota mais próxima de 20 *cents* é suficiente. Tanto o tampo de marupá quanto de abeto atendem a este requisito.

A terceira ressonância (1,2), que se situa na faixa entre 310 Hz e 350 Hz, é de grande importância. A posição do pico de frequência não influencia tanto na qualidade, mas o nível de pico, neste caso, é o mais crítico. Segundo Meyer [Meyer 1983], este critério apresentou a maior correlação com dados subjetivos de avaliação de qualidade de violões. Um nível alto nesta ressonância proporciona uma resposta adequada no registro médio da sexta corda e, ao mesmo tempo garante um reforço das componentes harmônicas da região grave. Além disso, é importante também verificar o quanto o pico da terceira ressonância se projeta a partir de sua base. Conforme a pesquisa de Meyer [Meyer, 1983], este critério também apresenta uma correlação positiva considerável com o julgamento da qualidade de violões. No tampo de marupá, a terceira ressonância apresenta uma faixa dinâmica menor que o tampo de abeto, talvez pelo fato das linhas nodais desta forma modal se localizarem próximas ao cavalete. Sendo assim, a capacidade de excitar este modo depende bastante do tipo de barramento harmônico usado.

A faixa de frequência que abarca estes primeiros modos (até cerca de 400 Hz) representa o comportamento vibratório do instrumento na região das notas fundamentais, decisivos para a sonoridade. O nível médio de cada ressonância deve ser alto, sobretudo para garantir um som encorpado no caso de uma sucessão lenta de notas nesse registro. Cabe também mencionar que as notas musicais em registros superiores também são beneficiadas indiretamente com essas componentes de baixa frequência, já que as ressonâncias baixas também são incorporadas no transiente inicial de ataque de cada nota. Este efeito pode ser negativo, no entanto, quando são executadas sucessões de notas muito rápidas, próximas entre si, porque influi na inteligibilidade de cada nota individual. Além disso, considera-se que as contribuições relativas dos primeiros modos possam ser em parte responsáveis por

estabelecer o equilíbrio entre a resposta aguda e grave do instrumento [Richardson, 2002].

Em relação aos modos (3,1) e (2,2), foram encontrados na literatura somente referências às frequências em que ocorrem em violões de tampo de abeto, conforme apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Frequências de ocorrência dos modos (3,1) e (2,2) na literatura.

REFERÊNCIA	Modo (3,1)	Modo (2,2)
[Mark, 2012]	525 Hz	640 Hz
[French, 2009]	417 Hz	476 Hz
[Fletcher e Rossing, 1998]	466 Hz	558 Hz
[Richardson, 1994]	553 Hz	628 Hz
<b>Violão OELA</b>	<b>436 Hz</b>	<b>505 Hz</b>

### 6.3 Análise das altas frequências para avaliação do timbre

Considerando a extensão das notas do violão, a região de frequência acima de 500 Hz é importante ao se comparar o comportamento dos violões de tampo de abeto e marupá. Para tal, os dados de aceleração medidos experimentalmente no violão de tampo de marupá são apresentados juntamente com os dados de aceleração disponíveis na literatura para o violão de tampo de abeto [French, 2009] no gráfico da Figura 6.4, com a ressalva de que não havia dados acima de 1000 Hz para o violão de tampo de abeto na referência citada. Os dados são apresentados em bandas de 1/3 de oitavas para facilitar a visualização.



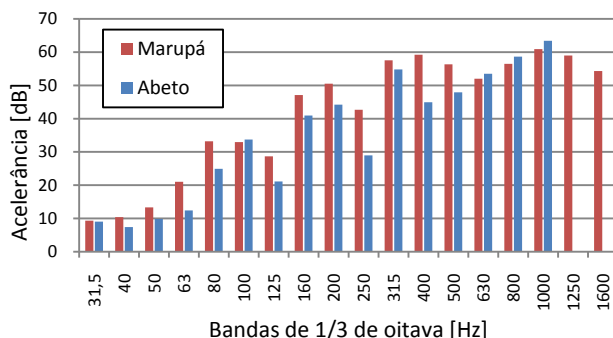


Figura 6.4 – FRF filtrada em bandas de terço de oitava de um típico violão de tampo de abeto (azul) em comparação com o tampo de marupá analisado (vermelho).

As discrepâncias entre os espectros contribuem para diferenças perceptíveis na resposta das notas executadas em ambos os instrumentos.

Em psicoacústica, o conceito de JND (*Just Noticeable Difference*) é usado para expressar tais diferenças de magnitude em um estímulo sonoro necessárias para um ouvinte ser capaz de notá-las [Gescheider, 1985]. Para estímulos apresentados em um nível de pressão sonora a partir de 20dB acima do limiar de ruído de fundo, esta diferença varia de 1dB a 4dB [Stevens, 1999], dependendo do número de componentes harmônicas e do tempo de duração de cada som. Cabe ressaltar que os valores apresentados na Figura 6.4 não representam níveis de pressão sonora, mas valores de aceleração medidos no tampo do violão. No entanto, os níveis radiados pelo tampo do instrumento serão diretamente influenciados pelos já citados formantes característicos de seu ressonador. Naturalmente, o aumento do nível de algumas bandas de 1/3 de oitava não corresponde necessariamente a um aumento significativo do nível global do som resultante, mas certamente tem influências no timbre do instrumento.

Considerando que uma determinada nota é excitada em uma das cordas do violão em estudo, cada componente harmônica gerada nesta corda será influenciada de forma independente, de acordo com a função resposta em frequência apresentada na Figura 6.4, que atua como um filtro. O timbre do som resultante é, portanto, fruto da combinação do espectro de excitação gerada pela vibração da corda com a curva de resposta do ressonador.

A curva de resposta do tampo acoplado à caixa de ressonância é uma característica inerente ao instrumento musical de cordas. Se, por exemplo, sua resposta em frequência apresenta uma região de ressonância em torno de 200 Hz, este irá amplificar todas as componentes cujas frequências estejam próximas a 200 Hz, não importando qual nota esteja sendo tocada, desde que a sua frequência fundamental encontre-se abaixo de 200 Hz.

Da mesma forma que, no mecanismo da fala humana os sons das vogais são determinados pelo processo de filtragem das ressonâncias produzidas no trato vocal, nos instrumentos musicais de cordas a região do espectro que reforça os harmônicos em uma faixa de frequência fixa é chamada de formante [Henrique, 2007]. Um instrumento musical de cordas (sua caixa de ressonância) pode ter vários formantes, sendo a percepção de tais influências específicas um complexo recurso utilizado pelo sistema auditivo como uma “assinatura” importante no processo de identificação de um instrumento musical [TRAUBE, 2004].

O timbre é um conceito claramente multidimensional, ou seja, influenciado por múltiplos fatores simultâneos. Grey [1977] apresenta três dimensões do timbre: a distribuição espectral de energia, a quantidade relativa de energia em alta frequência proveniente do transiente e a evolução temporal das amplitudes das parciais.

Alguns estudos mais recentes buscaram usar conceitos da psicoacústica para relacionar quantitativamente algumas dimensões ou espaços de percepções subjetivas com parâmetros físicos mensuráveis [MISDARIIS et al., 1998].

Outras pesquisas [Kendall, 1986] dão suporte à afirmação de que a percepção de timbre também depende do contexto musical. Diferentes estratégias têm sido aplicadas de acordo com os casos analisados, considerando sons dentro de contextos mais realistas.

O conceito de “brilho”, originalmente aplicado ao contexto da percepção visual, é também bastante usado para descrever sons musicais. Pesquisadores na área do timbre consideram o brilho uma das distinções perceptivas mais importantes entre os sons [Wessel, 1979; Kendall et al, 1999]. Sua quantificação em termos acústicos seria a presença de conteúdo de alta frequência, identificado por meio do cálculo do centróide espectral. O centróide espectral é uma medida usada em processamento digital de sinais para a caracterização do espectro de um determinado som, indicando a localização do que seria análogo ao “centro de gravidade” do conteúdo espectral ao longo do tempo [Loureiro e Paula, 2006; Grey e Gordon, 1978]. No seu cálculo, as frequências são ponderadas por suas respectivas amplitudes,

dividindo-se o resultado pela soma das amplitudes. O seu resultado permite estabelecer uma referência para estimar o conteúdo de alta frequência e, conseqüentemente, o brilho. Para uma função resposta em frequência de componentes  $P_i(f_i)$ , o centróide espectral pode ser calculado a partir da Equação 6.1 [Schubert e Wolfe, 2006]:

$$f_{CE} = \frac{\sum f_i P_i}{\sum P_i} \quad (6.1)$$

sendo  $f_i$  a frequência de cada componente espectral e  $P_i$  a amplitude linear de cada componente da FRF.

Em geral, altos valores de centróide correspondem a espectros com mais energia em alta frequência, o que se correlaciona com um som mais brilhante, enquanto os valores de centróide mais baixos correspondem aos espectros com mais energia de baixa frequência, resultando em um som mais opaco.

Na Figura 6.4, as diferenças no espectro da aceleração observadas em praticamente todas as bandas de 1/3 de oitava influenciam no timbre dos sons resultantes dos instrumentos comparados. Para exemplificar essas influências, foi usado o som da 6ª corda do violão ( $E^2 = 82,4$  Hz). Esta nota foi escolhida por apresentar a frequência fundamental mais baixa que o violão clássico, em sua afinação padrão ( $A^4 = 440$  Hz), pode produzir. Dessa forma, é possível avaliar os dados em uma faixa de frequências mais ampla. O violão de tampo de abeto usado para esta etapa da comparação foi construído por um consagrado *luthier* brasileiro e seu ano de fabricação é 1997, enquanto o violão de marupá foi construído na OELA em 2011. A corda usada nos dois instrumentos para este ensaio foi a 6ª corda do encordoamento de náilon modelo Giannini Série Clássico GENWPA, tendo sido instalada e afinada um dia antes da gravação.

O procedimento de gravação do som da 6ª corda consistiu em excitar a corda solta em cada instrumento usando o dedo polegar da mão direita, conforme é próprio da técnica violonística [Carlevaro, 1979]. A cadeia de equipamentos usada para gravação consistiu em um microfone condensador *Shure KSM109*, uma placa de aquisição de áudio e conversor analógico/digital *M-Audio Fast Track Pro*, conectados a um computador pessoal.

Cada som foi gravado e posteriormente analisado, sendo o centróide espectral calculado a partir da Equação 6.1. O cálculo tem como resultado um valor de frequência a cada intervalo de 0,02 segundo

e, em seguida, busca o valor da frequência da amostra espectral mais próxima do resultado calculado. A precisão depende da resolução usada na análise. Para a FFT usada de 2048, a resolução é de cerca de 20 Hz, de forma que o erro máximo no resultado é de 10 Hz.

A Figura 6.5 apresenta o resultado do centróide espectral calculado para os primeiros 5 segundos do som da 6ª corda, para os dois violões.

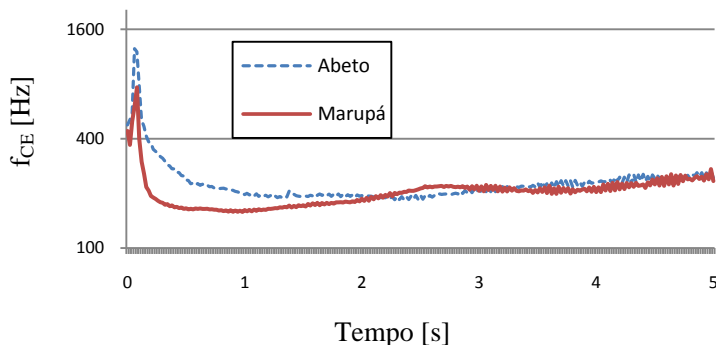


Figura 6.5 – Centróide espectral do som da 6ª corda do violão de tampo de abeto (azul) em comparação com o violão de tampo de marupá (vermelho).

Note-se que o transiente inicial do som, dado pela excitação da corda, apresenta maior conteúdo de alta frequência. Do resultado apresentado na Figura 6.5, pode-se concluir que o som do violão de tampo de abeto analisado tende a ser mais “brilhante” do que o do violão de tampo marupá.

Como o brilho está associado às altas frequências, a forma usada para aprofundar as análises nesta região espectral consistiu em filtrar a FRF de aceleração medida no violão de tampo de marupá em bandas de terço de oitava e determinar um valor médio da amplitude para cada grupo de bandas de terço de oitava. Isto resulta em espectros de barras, apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7. Esta análise provou ser interessante, em particular, pois para as frequências superiores, o comportamento modal do instrumento se torna mais complexo e não pode ser feito modo a modo.

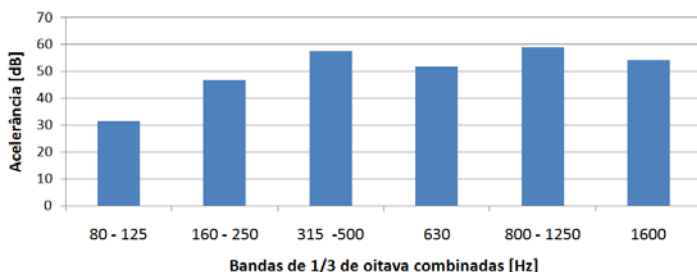


Figura 6.6 – FRF do tampo de marupá em bandas de terço de oitava combinadas.

As faixas de terço de oitava de 315 Hz a 500 Hz ( $D^4$  a  $C\#^5$ ) apresentam no tampo de marupá uma tendência semelhante no seu conjunto. Os altos níveis nessa região proporcionam mais detalhamento e definição nos sons graves do instrumento, pois abarcam parciais importantes.

A banda de terço de oitava centrada em 630 Hz compreende a região de  $D^5$  a  $F^5$ , onde valores extremos são considerados desvantajosos, ou seja, valores muito baixos fazem com que as notas executadas na primeira corda (E) soem irregulares, e valores "muito altos" resultam em timbre insatisfatório [Meyer, 1983]. O resultado para o marupá se apresentou entre esses dois extremos, o que resulta em um equilíbrio na emissão das notas da primeira corda.

As bandas de terço de oitava de 800 a 1250 Hz ( $F\#^5$  a  $F^6$ ) correspondem aproximadamente ao espectro que representa a sonoridade da vogal "A", geralmente considerada como sendo de particular importância no julgamento instrumentos musicais [TRAUBE, 2004]. Um alto valor apresentado pelo violão de marupá no nível dessa faixa é especialmente vantajoso em peças cuja faixa tonal estende-se a frequências mais altas. Dessa forma, a banda centrada em 1.250 Hz é particularmente importante para os registros mais altos, no que se refere às parciais superiores.

Acima da banda de terço de oitava de 1250 Hz qualquer discrepância pode conduzir a um som considerado "não natural", de timbre indesejável para o som esperado de um violão clássico. No entanto, esta faixa de frequência é fundamental para o brilho e clareza do timbre e também para o ataque claro de uma nota. Com base na opinião geral de ouvintes especializados [Meyer, 1983], o nível médio não deve ser nem muito alto e nem muito baixo. Níveis elevados representam uma vantagem neste caso somente na definição de acordes

e, devido à clareza, também em melodias rápidas de notas próximas. Geralmente, este efeito produz uma dureza indesejável, o que é particularmente evitado em uma linha melódica executada no baixo.

Para mensurar esse efeito, foi calculada a diferença de nível entre o valor médio das faixas combinadas de terço de oitavas de 80Hz a 1000Hz e 1250Hz a 1600Hz.

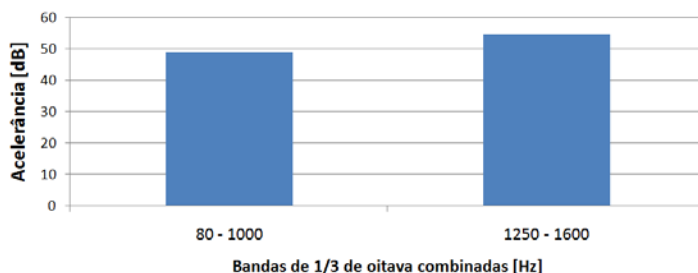


Figura 6.7 – FRF típica do tampo de marupá em bandas de terço de oitava combinadas.

Esta diferença representa uma medida do equilíbrio entre o corpo de som e a clareza e não deve ser muito grande. Se exceder o valor de 6 dB [Meyer, 1983], a impressão do som do instrumento será fraca, e o ataque de uma nota não será suficientemente claro, o que se torna ainda mais evidente entre notas próximas. Valores baixos para este balanço não são tão críticos, pois a clareza exagerada é, aparentemente, preferível a um som turvo e sem definição. O violão de tampo de marupá apresentou um balanço de 5,52 dB, ou seja, dentro do valor desejável.

Resumindo os pontos mais importantes vistos nesse item, o valor de pico da terceira ressonância e as faixas de terço de oitava combinadas de 80 Hz a 1000 Hz em relação às de 1250 Hz em diante são as de maior importância, seguidos pelo fator Q da primeira e segunda ressonâncias, bem como a distância em *cents* de suas frequências de notas vizinhas e, finalmente, a relação fracionária entre as posições dos primeiros dois modos. Ao analisar diretamente a FRF do violão montado, outros critérios são de importância secundária, e se tornam relevantes apenas quando os critérios principais mencionados neste item se encontram próximos do considerado ideal. O violão de tampo de marupá atendeu a todos os critérios estabelecidos, com exceção do fato da primeira ressonância se encontrar muito próxima (2,1 *cents*) da nota fundamental E<sup>2</sup>, relacionada à sexta corda solta, o que pode

proporcionar um desequilíbrio dessa nota em relação às notas adjacentes.

Cabe ressaltar que a meta de sintonizar as duas primeiras ressonâncias fundamentais precisamente em uma relação de uma oitava [Letowski e Bartz, 1971] provém somente da observação de que as ressonâncias de um dos violões mais bem qualificados já medidos se encontravam espaçadas a exatamente uma oitava. Não houve mais nenhuma outra correlação comprovada. Há também opiniões contrárias a isso [Hutchins, 1998], alegando que poderia haver uma única nota que soasse com mais energia, e que um bom instrumento não deverá ter quaisquer notas particularmente mais fortes ou suaves que as outras.

Especificamente sobre as ressonâncias acima de 1kHz, pode-se afirmar que estas contribuem no timbre de todas as notas com frequência fundamental inferior. Em geral, parece particularmente útil que o instrumento apresente ressonâncias na faixa de 2kHz a 4kHz em que a audição humana é mais sensível.

## **6.4 Critérios objetivos aplicados às propriedades mecânicas da madeira**

Na busca de uma direção para a avaliação da qualidade de um instrumento, tem-se também procurado analisar as razões físicas objetivas que levam determinados instrumentos ou materiais a serem considerados como referências pela maioria dos músicos. Para tal, busca-se determinar características físicas que se relacionam a resultados sonoros avaliados positivamente por um grande número de pessoas.

Schelleng [Schelleng, 1963] demonstrou que, para que o comportamento à flexão de duas placas homogêneas seja o mesmo, a sua rigidez por unidade de comprimento e densidade por unidade de área devem ser as mesmas. Isto pode ser resumido pelas seguintes relações:

$$(E_1 h_1)^3 = (E_2 h_2)^3 \quad (6.3)$$

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2 \quad (6.4)$$

onde  $E_i$  é o módulo de Young,  $h_i$  é a espessura e  $\rho_i$  é a densidade. Os subscritos 1 e 2 representam dois materiais com mesmo comportamento à flexão.

Segundo os critérios de Schelleng, mesmo que um material alternativo não alcance a mesma rigidez de uma referência, a espessura pode ser alterada, desde que o critério de densidade de área seja respeitado. No entanto, se o critério de densidade de área for excedido, o material dado pode não ser um bom substituto para a madeira de referência. Schelleng também demonstrou porque o abeto (*Picea abies*), madeira tradicionalmente utilizada para tampos de violão, é excelente para essa finalidade, por possuir uma baixa densidade, módulo de elasticidade elevado e baixo amortecimento. Por esta razão, é normalmente usada como o valor de referência, quando se procura um material substituto.

Haines e Chang [1975] deram continuidade ao trabalho de Schelleng para justificar a utilização de um material não homogêneo. Seus critérios foram obtidos a partir das equações de movimento de flexão de uma placa plana. Os critérios de avaliação foram essencialmente os mesmos que aqueles propostos por Schelleng com dois critérios adicionais; alto grau de anisotropia e baixo amortecimento. Um amortecimento baixo é desejável para que a energia vibratória do instrumento musical não decaia muito rapidamente. A importância do critério relacionado ao grau de anisotropia foi demonstrada mais tarde por Ono [Ono et al, 2002] utilizando as funções de resposta em frequência de várias placas. Foi demonstrado que as placas com uma grande variação de rigidez ao longo do plano respondem melhor a uma ampla faixa de frequências. As placas isotrópicas respondem bem somente a uma faixa limitada de frequências.

O trabalho de Haines propôs os seguintes valores quantitativos baseados em um tampo típico de abeto com 2,5 milímetros de espessura: Razão da rigidez à flexão  $E_x/E_y$  (também conhecido como grau de anisotropia) de pelo menos 12; proporção da rigidez à flexão na direção longitudinal para a densidade de área de, pelo menos,  $0,12 \times 10^8 (\text{m/s})^2$ ; densidade de área entre 1,1 e  $1,4 \text{ kg/m}^2$ ; amortecimento (longitudinal e transversal) decaindo com frequência.

A Tabela 6.4 apresenta os valores das métricas propostas por Haines, aplicadas às três espécies analisadas nesta tese. A relação de decaimento do amortecimento com a frequência pode ser verificado nas Figuras de 3.15 a 3.19, apresentadas no capítulo 3. Como se pode verificar, os resultados obtidos para o marupá, além de atenderem aos critérios objetivos propostos, são comparáveis aos resultados das espécies de referência para fabricação de instrumentos de qualidade.



Tabela 6.4 - Resultado dos critérios propostos por Haines e Chang [1975].

	Razão da rigidez	Rigidez por densidade de área [(m/s) <sup>2</sup> ]	Densidade de área [kg/m <sup>2</sup> ]	Amortecimento decaindo com a frequência
ABETO	13,22 ± 0,17	7,96 x10 <sup>9</sup>	1,39	OK
CEDRO	16,29 ± 1,45	4,61 x10 <sup>9</sup>	1,13	OK
MARUPÁ	14,62 ± 1,04	7,42 x10 <sup>9</sup>	1,24	OK
<b>Valores recomendados</b>	<b>12,00</b>	<b>&gt; 1,2 x 10<sup>7</sup></b>	<b>1,1 a 1,4</b>	<b>OK</b>

Em geral, os pesquisadores citados concordam que materiais com baixa densidade, alto módulo de elasticidade e baixo amortecimento na direção principal de vibração são os melhores para tampos.

Estes três fatores podem ser resumidos através do seguinte critério denominado pela letra  $\kappa$ , proposto por [Ono et al, 2002]:

$$\kappa = \frac{\eta}{\left(\frac{E_l}{\gamma}\right)} \quad (6.5)$$

onde  $\eta$ ,  $E_l$  e  $\gamma$  são o amortecimento (fator de perda), módulo de elasticidade longitudinal e densidade específica, respectivamente. A densidade específica é a relação entre a densidade de um material dividido pela densidade da água a 4° C (1000 kg/m<sup>3</sup>).

Os resultados relacionados aos critérios propostos por Ono [2002] são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Resultados dos critérios propostos por Ono [2002].

	$E_l$ (GPa)	$\eta$ (X10 <sup>-3</sup> )	$\gamma$	$\log_{10}(\kappa)$
ABETO	10,1	9,7	0,46	-12,35
CEDRO	5,21	9,3	0,38	-12,17
MARUPÁ	9,19	8,6	0,41	-12,41

Os resultados concordam bem com os obtidos por Ono et al [Ono e Morimoto, 1985]. Particularmente, o marupá apresenta valores para o amortecimento comparáveis às outras duas espécies, bem como um elevado módulo de Young.

## 6.5 Experiência dos construtores

Mesmo os artesãos experientes podem ter pontos de vista diversos sobre o mesmo assunto. Richard Bruné [BRUNÉ, página virtual] é um famoso fabricante de violões clássicos. Atuou como músico profissional antes de se tornar um *luthier*, e ficou internacionalmente conhecido por ter vendido instrumentos para artistas qualificados, como por exemplo, Andrés Segovia [Segovia, 1976]. Questionado sobre a ordem de importância dos elementos na construção de um violão, Bruné elaborou uma lista [Bruné, 2004] onde a espécie de madeira escolhida para o tampo é citada como uma das últimas. Questionado sobre isso, citou o exemplo de um violino Guarneri, 1680, vendido em leilão por cerca de 200.000 dólares apesar do fato de possuir um nó pronunciado na madeira do tampo.

Quando se trata de “madeira ressonante”, a definição de qualidade tem atraído um grande interesse ao longo de décadas, porém encontra-se incompleta. Como já citado muitas vezes nesse trabalho, o abeto (*Picea abies*) adquiriu ao longo dos tempos uma excelente reputação para a construção de tampos de instrumentos de cordas e, portanto, tem sido escolhido como o foco de investigação dos principais trabalhos da área.

Christoph Buksnowitz e sua equipe [Buksnowitz et al, 2007] da Universidade de Recursos Naturais e Ciências Aplicadas da Vida em Viena, Áustria, realizaram uma ampla pesquisa com madeiras pré-selecionadas por renomados *luthiers*, para verificar sua qualidade para a fabricação de instrumentos. Concluiu que os *luthiers* eram geralmente incapazes de escolher as madeiras que apresentam melhor desempenho segundo testes acústicos feitos em laboratório.

Os *luthiers* fizeram suas escolhas apenas por inspeção visual e tátil, sem o uso de quaisquer ferramentas, sendo esta uma prática normal nesse meio. Os artesãos tendem a confiar em regras tradicionais e impressões subjetivas ao decidir que madeira usar.

Foram selecionadas 84 amostras de abeto da Noruega (*Picea abies*). Estas foram apresentadas aos 14 principais construtores de violino austríacos sob a forma de placas que mediam 40 por 15 cm. Os

*luthiers* foram solicitados a qualificar as amostras de acordo com a acústica, aparência e adequação para uso na fabricação de violinos.

Enquanto os *luthiers* tiveram que confiar em seus sentidos e experiência, usando técnicas tradicionais, como percutir na madeira (*tapping*) para avaliar o seu som, os pesquisadores realizaram testes de laboratório focados na resistência, rigidez e amortecimento.

Comparando-se as classificações profissionais e científicas, o resultado da pesquisa concluiu que não houve relação entre as opiniões dos *luthiers* e as propriedades medidas que teoricamente dariam à madeira um bom som.

As avaliações corretas foram feitas principalmente a partir de características visuais, como a cor e a condição dos grãos. Algumas propriedades importantes, tais como a densidade, coincidem com as evidências que podem ser vistas a olho nu.

Existem fabricantes que afirmam poder construir um bom instrumento de qualquer pedaço de madeira [Cardoso, 2011]. A seleção de material para instrumentos musicais tem sido uma arte desenvolvida ao longo dos séculos. Para um violão, as diferentes partes do instrumento são tradicionalmente feitas de diferentes tipos de madeira, sendo o tampo responsável por grande parte das qualidades tonais do instrumento final.

Cabe ressaltar ainda que, para os fabricantes mais qualificados, que já dominam a técnica da *lutheria*, a única esperança de chegar a fazer instrumentos ainda melhores é ter acesso às melhores madeiras. Por outro lado, para uma produção em massa, a madeira pode vir a ser o fator determinante na qualidade final da média dos instrumentos.

O fato de que alguns instrumentos, ocasionalmente, tornam-se famosos sem satisfazer as exigências estéticas esperadas (por exemplo, contêm irregularidades ou pequenos defeitos) pode ser visto como um indicativo claro de que a madeira pode comportar-se bem em um instrumento por várias razões. Por exemplo, uma irregularidade no crescimento conhecida como “Hazel” é vista como algo especialmente favorável pela maioria dos *luthiers* e estudiosos da madeira [Račko e Čunderlík, 2007; Romagnoli et al, 2003].

## 6.6 Critérios subjetivos: os testes cegos

A questão de qualidade musical é um ponto extremamente subjetivo. Desde o início do século 19, os instrumentos fabricados pelo *luthier* italiano Antonio Stradivarius [Hill e Davis, 1963] são uma referência.

Um dos testes cegos mais famosos foi promovido pela BBC em 1974, onde foram convidados dois grandes músicos e um experiente revendedor de violinos, os quais foram solicitados a identificar alguns modelos sem a ajuda da visão: o “Chaconne”, famoso violino Stradivarius fabricado em 1725, um “Guarneri del Gesu” de 1739, um “Vuillaume” de 1846 e um instrumento moderno feito por um consagrado *luthier* inglês.

Nenhum dos peritos foi capaz de identificar corretamente mais do que dois dos quatro instrumentos e, de fato, dois dos jurados pensaram que o instrumento moderno era o “Chaconne” de Stradivarius.

Existe outro registro de um teste cego que ocorreu durante um evento de produtos florestais da Alemanha em 2009. A parceria entre um pesquisador e um *luthier* resultou em violino fabricado usando madeira tratada com uma espécie de fungo, e ficou conhecido como “violino biotecnológico”. Este instrumento foi testado contra outros importantes violinos, incluindo um Stradivarius de 1711. Um experiente violinista tocou cinco instrumentos diferentes, sendo dois com madeira tratada com fungos e os outros três com madeira não tratada. Um júri de especialistas julgou a qualidade de som dos violinos. Dos 180 participantes, metade julgou o violino tratado por fungos como sendo o melhor.

O vencedor foi chamado de “Opus 58” e havia sido feito de uma madeira que tinha sido tratada com fungo por um período mais longo, de nove meses. O tratamento com fungos altera a estrutura celular da madeira, reduzindo a sua densidade e ao mesmo tempo aumentando a sua homogeneidade.

Procurou-se deixar claro nesta tese que a estimativa prévia das propriedades mecânicas não é pré-requisito para a construção de bons instrumentos musicais, já que a sua resposta acústica pode ser modificada durante as etapas do processo. No entanto, somente madeiras que estejam dentro de certas faixas de propriedades têm o potencial para serem transformadas em bons tampos de ressonância. O marupá (*Simarouba amara*) atendeu a todos os requisitos objetivos para ser usado na fabricação do violão clássico, que não somente o compararam a duas espécies tradicionais de referência na construção de tampos de violões, como também permitiram verificar o desempenho em um instrumento finalizado, através da análise dos principais modos de vibração, a partir de suas funções de resposta em frequência.

Quando um instrumento chega ao mercado, a percepção de qualidade é sempre avaliada sob um ponto de vista que privilegia questões subjetivas. E essa avaliação refere-se ao instrumento final, que

é resultado de muitos fatores além da madeira. Escolher uma boa madeira é apenas uma pequena parte da equação para se obter qualidade sonora. De fato, é a sensibilidade em conjunto com a habilidade do artesão que resultam em um bom instrumento. A forma como a madeira é trabalhada faz uma grande diferença no som. Um fabricante experiente pode lidar com as imperfeições no material e compensá-las.

Na ausência de uma forma unificada, aceita pela comunidade (músicos, construtores, revendedores) pela qual se possa classificar a qualidade de um violão, optou-se por não realizar testes subjetivos neste trabalho de pesquisa.

Finalmente, outro ponto a se considerar é a avaliação de um determinado instrumento em relação à sua finalidade em um contexto de um tipo de música em particular. Pesquisadores que também são músicos [Henrique, 2007] chamam a atenção para isso, alegando que o critério de qualificação de um instrumento não é o mesmo para um músico erudito, de jazz ou música popular, da mesma forma que o timbre do instrumento buscado por um violonista solista certamente não será o mesmo de um acompanhador de choro ou integrante de um sexteto de violões.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo dessa pesquisa, muito foi aprendido sobre o funcionamento do violão clássico, embora o foco principal da tese seja mais direcionado para o estudo das propriedades do material que o constitui, a madeira. Para a caracterização completa de toda a inter-relação dos diversos fatores que influenciam no resultado final do instrumento, ainda há muito trabalho a ser feito. Como os instrumentos são ferramentas com as quais os músicos se expressam dentro de um contexto musical, o instrumento "ideal" que atenda ao gosto de todos os músicos nunca será encontrado.

Os resultados relacionados aos tampos livres, surpreendentemente, não tem sido objeto de muita atenção na literatura, talvez por dificuldades práticas na medição. No entanto, as informações fornecidas no Capítulo 5 mostram que o tampo de marupá apresenta um comportamento vibratório que o coloca em igualdade com as outras espécies tradicionais usadas como referência ao longo de séculos. Os resultados do Capítulo 6, em que o tampo se encontra montado em um violão completo, confirmam essa afirmação.

A contribuição principal deste trabalho é demonstrar, por meio de comparação com madeiras consideradas como referência, que a espécie de madeira tropical analisada, o marupá (*Simarouba amara*), se encaixa na faixa de propriedades e características consideradas boas para a construção de um cordofone, sendo utilizada para tal a caracterização experimental e numérica do tampo livre, complementada posteriormente com a análise do corpo completo do instrumento.

A acústica musical será sempre essencialmente interdisciplinar, para melhor compreender o “como” e o “porquê” de se fazer música. É evidente que os instrumentos musicais têm qualidades intrínsecas, que podem ser medidas de várias maneiras, mas essas qualidades somente são significativas no contexto da capacidade de um músico expressar-se com o instrumento em questão. Apesar dos avanços na compreensão dos aspectos físicos dos instrumentos musicais, ainda somos dependentes da relevante opinião dos musicistas.

Ainda sobre a questão das madeiras, a maior dificuldade encontrada pelos construtores é competir com a tradição de espécies usadas há séculos pelos *luthiers* europeus. Esteticamente, as madeiras importadas permitem um acabamento menos poroso e com maior brilho (visual). Por causa do clima tropical, as árvores brasileiras crescem mais rapidamente e os poros são mais abertos, dando uma aparência mais rústica ao instrumento.

O timbre e a qualidade do som que produz um corpo vibratório se devem à presença de frequências harmônicas próprias, também denominadas sobretons ou parciais superiores. Quais componentes tonais de um corpo soarão mais forte dependerá de muitos elementos. Instrumentos como o violão clássico possuem timbre muito específico e ao usar madeiras brasileiras pode haver alteração no som. Por isso, a maior parte dos construtores só utiliza as madeiras importadas na fabricação desses instrumentos, pois acreditam que além da estética, para conseguirem um resultado esperado pelo mercado é preciso garantir o som tradicional. A experimentação com madeiras alternativas pode se beneficiar bastante deste trabalho de pesquisa, tanto em relação à metodologia proposta para a medição das propriedades mecânicas do tampo ainda desmontado, quanto das simulações numéricas. A integração dessas ferramentas ao conhecimento empírico dos artesãos pode ajudar consideravelmente a tomada de decisão na escolha de materiais ou o planejamento de possíveis alterações na forma de construção.

Cabe evidenciar que o próprio som esperado para o violão é resultado de uma tradição cultural, construída ao longo de séculos, a partir de uma sucessão de valores dependentes do tipo de música sendo executada e a estética associada à mesma.

Por conta da tradição dos músicos e da dificuldade de comércio das madeiras nacionais apropriadas para a fabricação dos instrumentos musicais, as pesquisas da aplicação de novas espécies restringem-se a encomendas de indústrias, pesquisas universitárias ou de particulares que se dedicam à fabricação artesanal.

É fundamental que seja elaborado um banco de informações referenciadas às espécies alternativas juntamente com as tradicionais, que representam indiscutivelmente excelentes referências para aprofundar os estudos sobre aspectos mais específicos e precisos ainda não tão bem compreendidos.

Anisotropia, acoplamentos higromecânicos, modelagem considerando parâmetros biológicos, e, finalmente, a percepção de material por *luthiers* e músicos estão entre os temas que merecem maior investigação em trabalhos futuros.

Este projeto de pesquisa contou com uma colaboração entre o EMC/UFSC (Departamento de Engenharia Mecânica), o GIEM/UFSC (Grupo Interdisciplinar do Estudo da Madeira), o INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) e a OELA (Oficina Escola de Lutheria da Amazônia). Através do Programa Institucional de Bolsas de Doutorado Sanduíche no Exterior e do convênio já existente entre a

UFSC e o Instituto Politécnico do Porto, em Portugal, esta etapa do trabalho de pesquisa foi realizada no Laboratório de Acústica Musical (LAM).



## REFERÊNCIAS

ABEMUSICA - Associação Brasileira de Música. “Estatísticas: retrospectos de importações e exportações para instrumentos musicais”, 2008. Disponível em: <<http://www.abemusica.com.br/estatisticas.html>>. Acesso em: 01/02/2013.

ARAMAKI, M.; BAILLÈRES, H.; BRANCHERIAU, L.; KRONLAND-MARTINET, R.; YSTAD, S. “*Sound quality assessment of wood for xylophone bars*”, J. Acoust. Soc. Am. 121(4), 2407-2421, 2007.

BARRETO, P.; SOUZA JR., C.; GALVÃO, C.; ALBUQUERQUE, K.; GISELLE, A.; MACEDO, M.; FIRESTONE, L. “Controle do desmatamento da exploração de madeira na Amazônia: diagnóstico e sugestões”. Relatório Técnico do IMIMAZON. MM A/PPG7/ProManejo. Belém, 2002.

BEAVITT, A. “*Humidity cycling*”. Strad, Novembro: 916–920, 1996.

BENADE, A. H. “*Fundamentals of musical acoustics*”, 2ª edição revisada, ed. Dover, Mineola, New York, USA, 1990.

BERTSCH, M.; BROWN, A.W. “*The paradox of musical acoustics: Objectivizing the essentially subjective*”. Proc. of the Conference on Interdisciplinary Musicology, 2004.

BODIG, J.; JAYNE, B. “*Mechanics of Wood and Wood Composites*”. Van Nostrand Reinhold Company, 15th edition, New York, 1982.

BRÉMAUD, I. “*What do we know on resonance wood properties ? Selective review and ongoing research*”. Acoustics 2012 Nantes, França, abril de 2012.

BRUNÉ, R.E. “*Eight Concerns of Highly Successful Luthiers*”. American Lutherie 79 6–21, 2004.

BRUNÉ, R.E. - Página virtual - Disponível em: <<http://http://www.rebrune.com/>>

BUCUR, V. “*Acoustics of wood*”, 2a ed. Springer Series in Wood Science, Springer, Berlin, Germany, 2006.

BUKSNOWITZ, C.; TEISCHINGER, A.; MÜLLER, U.; PAHLER, A; EVANS, R. “*Resonance wood – evaluation and prediction of violin makers quality-grading*”, J. Acoust. Soc. Am. 121(4), 2384–2395, 2007.

BURGER, M.B.; RICHTER, H.G. “*Anatomia da Madeira*”. Ed. Nobel. CUTTER, E.G, 1991.

CALDERSMITH, G.: “*Designing a guitar family*”. Applied Acoustics 465, 3–17, 1995.

CARDOSO, O; “*Óscar Cardoso – Guitarreiro*”, CML/EGEAC - Museu do Fado, Lisboa, 2011.

CARLEVARO, Abel. “*Escuela de la guitarra. Exposición de la teoria instrumental*”. Buenos Aires: Barry Editorial, Ind. S.L.R., 1979.

CHRISTENSEN, O. “*The response of played guitars at middle frequencies*”. Revista Acustica, 53:45–48, 1983.

CHRISTENSEN, O; VISTISEN, B. “*Simple model for low-frequency guitar function*”. Journal of the Acoustical Society of America 68, No. 3, 1980.

COFER W.F; DU, Y; HERMANSON, J.C. “*Development of a simple three dimensional constitutive model for the analysis of wood*”. American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, AMD, 1999.

COMSOL “*Structural Mechanics Module User’s Guide*”.

COURTNALL, R. “*Making Master Guitars*”. Londres: Robert Hale, 1993.

DI BELLA A.; PIASENTINI, F.; ZECCHIN, R. “*Violin Top Wood Qualification: Influence of Growth Ring Distance on Acoustical Properties of Red Spruce*”. CAS Journal 4: 22–25, 2002.

DINWOODIE, J. M. “*Timber, its nature and behavior*”, 2a ed. E & FN Spon, London, UK, 2000.

DUDEQUE, Norton Eloy. “História do Violão”. Curitiba: Ed. da UFPR, 1994.

E0756-05. “*Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*”, Norma internacional da ASTM, 2005.

EZCURRA A, ELEJABARRIETA MJ, SANTAMARI C. “*Fluid-structure coupling in the guitar box: numerical and experimental comparative study*”. Applied Acoustics; 66:411–25, 2005.

FLETCHER, N. H; ROSSING, T. D. “*The Physics of Musical Instruments*”. Springer, New York, 1998.

FRENCH, R. M. “*Engineering the guitar - theory and practice*”, Springer, New York, pp142, 2009.

FSC - Forest Stewardship Council. Disponível em: <<http://www.fsc.org>>

FURLANI J.E. “Um Estudo Sobre a Variação Numérica do Coeficiente de Poisson na Madeira, Considerando a Anisotropia do Material”. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP; 1995

GESCHEIDER, G. A. “*Psychophysics-Method, Theory, and Application*”, Segunda Edição, Lawrence Erlbaum Assoc., Hillsdale, NJ, 1985.

GOMES, R.; LAGE, R.; MOURÃO, A. “Manual de *Lutheria*: curso básico”. UNICEF. Manaus, 2004.

GONZAGA, A. L. “Madeira: Uso e Conservação”. Cadernos Técnicos n.6. Brasília, DF: IPHAN/MONUMENTA, 2006.

GOODMAN, J. R.; BODIG, J. “*Orthotropic Strength of Wood in Compression*”. Wood Science 4(2), pp. 83-94, 1971.

GRANGER, J.; TRUMP, M. "*Musicwood*". [Filme]. Produção de Josh Granger, direção de Maxine Trump. Helpman Productions, DVD, 80 min, 2012.

GREY, J. M. "*Multidimensional Perceptual Scaling of Musical Timbre*". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 61, pp. 1270-1277, 1977.

GREY, J. M., GORDON, J. W. "*Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres*". Journal of the Acoustical Society of America 63 (5), 1493–1500, 1978.

HAINES, D. W. "*On musical instrument wood*". Catgut Acoustical Society Newsletter 1: 23–32, 1979.

HAINES, D. W. "*The essential mechanical properties of wood prepared for music instruments*". Journal of the Catgut Acoustical Society, 4(2), 2000.

HAINES, D. W. and N. Chang, "*Application of Graphite Composites in Musical Instruments*". American Society of Mechanical Engineers, 1975.

HALL, D. "*Musical Acoustics*", 2<sup>a</sup> ed. Brooks/Cole Pub. Co., Belmont, California, 1991.

HENRIQUE, L. L. "Acústica musical". 2<sup>a</sup> edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.

HERMANSON, J., STAHL, D., CRAMER, S., SHALER, S., "*Transformation of elastic properties for lumber with cross grain*". Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 10, pp. 1402-1408, 1997.

HILL, W.H.; DAVIS, F. A. "*Antonio Stradivari: His Life and Work*", Dover Publications, 1963

HUBER, J. "*The Development of the Modern Guitar*", p. 5. Westport: Bold Strummer, 1994.

HUNT, D. G.; BALSAN, E. "*Why old fiddles sound sweeter*". Nature 379: 681, 1996.

HUTCHINS, C.M. “*A Measurable Effect of Long-Term Playing on Violin Family Instruments*”. *Catgut Acoustical Society Journal*, 3(5) pp 38–40, 1998.

IBAMA/LPF – “Madeiras Comerciais do Brasil - Chave interativa de Identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos”. Parceria do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e do Laboratório de Produtos Florestais (LPF). Tipo de publicação: CD-ROM.

Instrução Normativa MMA nº 6, “Lista Oficial de Espécies Brasileiras Ameaçadas de Extinção”, 23 de setembro de 2008.

JANSSON, E. V. “*Acoustical properties of complex cavities: Prediction and measurement of resonance properties of violin-shaped and guitar shaped cavities*”. *Acustica*, 37(4):211–221, 1977.

JANSSON, E. V. “*Acoustics for the guitar player*”. Em “*Function, Construction and Quality of the Guitar*”. Royal Swedish Academy of Music, Stockholm, no. 38, 1983.

JANSSON, E. V. “*Acoustics for violin and guitar makers*”. Kungl Tekniska Hogskolan (Swedish Department of Speech, Music and Hearing), Stockholm, 4a edição, 2002.

JORDAN, R. “Análise Modal Experimental”. Apostila do POSMEC, UFSC, Florianópolis, 2010.

JOZSA, L.A., MIDDLETON, G. “*A discussion of wood quality attributes and their practical implications*”. Publicação Especial nº. SP-34. Vancouver, BC: Forintek Canada Corp, 1994.

KENDALL, R. A. “*The role of acoustic signal partitions in listener categorization of musical phrases*” *Music Perception* 4, 185–214, 1986.

KENDALL, R., CARTERETTE, E., & HAJDA, J. “*Perceptual and acoustical features of natural and synthetic orchestral instrument tones*”. *Music Perception*, 16(3), 327–364, 1999.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T. ; OHTA, M. “*Effect of annual ring widths on structural and vibrational properties of wood*”, Mokuzai gakkaiishi 43(8), 634-641 , 1997.

LETOWSKI , T. ; BARTZ, J. “*Obietywne Kryteria Jakosci Pudel Gitarowych*”, Arch. Akust, p. 37, 1971.

LOUREIRO, M. A. “A pesquisa empírica em expressividade musical: métodos e modelos de representação e extração de informação de conteúdo expressivo musical”. Revista Opus n.12, 2006.

LPF - Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro; “Avaliação das Espécies Madeireiras da Amazônia Seleccionadas para a Manufatura de Instrumentos Musicais”, parceria IBDF, Funarte, INPA e IPT, 1989.

MAIA, N.M.; SILVA, N.M. “*Theoretical and Experimental Modal Analysis*”. Taunton: Research Studies Press LTD, 1997.

MARK, R. “*Technology of the Guitar*”, Springer, New York, 2012.

MARQUES, M. H. B.; MARTINS, V. A.; SOUZA, M. R.; ALVES, M. V. S. “Efeito da secagem nas propriedades acústicas da madeira de marupá”. Floresta e Ambiente, V.12, n.2, p. 57 - 64, nov/dez 2006.

MARQUES, M; INACIO, O; DEBUT, V; ANTUNES, J. “*On The Dynamical Behaviour of Worn Guitar Strings*”, ICSV 19 , 2012.

MARTÍNEZ, M. A. P. “*Comparative study between numerical and experimental techniques applied to modal analysis with reference to musical instruments*”. Trabalho de conclusão de curso, ESMUC - Escola Superior de Música da Catalúnia, 2009.

MASCIA, N.T. “Considerações a respeito da anisotropia na madeira”. Dissertação de mestrado, EESC-USP, 1991.

MCINTYRE, M. E., WOODHOUSE, J. “*The acoustics of stringed musical instruments*”. Interdisciplinary Science Reviews, 3:157-173, 1978.

MERINO, J. M. “*Las Vibraciones de la Musica*”. San Vicente (Alicante), p. 172. Editorial Club Universitario, 2008.

MEYER, J. “*Quality aspects of the guitar tone*”. Em: E. V. Jansson (ed.) *Function, Construction and Quality of the Guitar*. Royal Swedish Academy of Music, Stockholm, Publicação no. 38, 1983.

MISDARIIS, N. R., SMITH, B. K., PRESSNITZER, D., SUSINI, P. e MCADAMS, S. “*Validation of a Multidimensional Distance Model for Perceptual Dissimilarities Among Musical Timbres*”. Anais do 16th International Congress on Acoustics. Woodbury, New York: ASA - The Acoustical Society of America, 1998.

NEWLAND, D. E. “*Mechanical Vibration Analysis and Computation*”, Longman, Harlow, UK, 1989.

NOGUEIRA, E. F.. “A Evolução do Violão na História da Música”. São Paulo, 1991. Disponível em: <[http://www.estrelabrasileira3.com.br/mpb\\_hist%20violao.html](http://www.estrelabrasileira3.com.br/mpb_hist%20violao.html)> Acesso em: 30/10/12.

OBATAYA, E., ONO, T., NORIMOTO, M. “*Vibrational properties of wood along the grain*”, J. Mater. Sci. 35 2993-3001, 2000.

ONO, T. , NORIMOTO, M. , “*Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of Wood for musical instruments*”, Jpn. J. Appl. Phys. 22(4), 611-614 , 1983.

ONO, T., MIYAKOSHI, S; WATANABE, U. “*Acoustic characteristics of unidirectionally fiber-reinforced polyurethane foam composites for musical instrument soundboards*”. Acoustical Science and Technology. 23(3): p. 135-142, 2002.

ONO, T.; MORIMOTO, M. “*Anisotropy of dynamic Young's modulus and internal friction in wood*”. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 (Regular Papers & Short Notes). 24(8): p. 960-4, 1985.

PERKINS, R.W. “*Fundamental Concepts Concerning the Mechanics of Wood Deformation: Strength and Plastic Behaviour*”. Forest Prod. J., 17(4), pp. 57-68, 1967.

PORTELA, M; INÁCIO, O; RIBEIRO, R. “Dimensionamento de Placas Metálicas Afinadas - O Instrumento Musical *Bell-Plate*”, VIII Congresso Iberoamericano de Acústica, Évora, Portugal, 2012.

RACKO, V.; CUNDERLÍK, I. “*Selected Mechanical Properties of Hazel Wood in Norway Spruce (Picea abies l.)*”, Wood Structure and Properties 06, Ed. Arbora, 2007.

RICHARDSON, B. E. “*A Physical Investigation Into Some Factors Affecting the Musical Performance of the Guitar*”, Tese de doutorado, University of Wales, 1982.

RICHARDSON, B. E. “*The acoustical development of the guitar*”. Journal of the Catgut Acoustical Society, Vol 2, Nº 5 (Series II), 1994.

RICHARDSON, B. E. “*Simple models as basis for guitar design*”, Journal Catgut Acoustical Society, 4(5), 30-36, 2002.

RICHARDSON, B.E. “*Mode Studies of Plucked Stringed Instruments: Application of Holographic Interferometry*”. Proceedings of the Second Vienna Talk, University of Music and Performing Arts Vienna, Austria, 2010.

ROMAGNOLI, M, BERNABEL, M; CODIPIETRO, G. “*Density variations in spruce wood with indented rings (Picea abies Karst)*”, 2003.

ROMANILLOS, J. L. “*Antonio de Torres, Guitar Maker, His Life & Work*”. pp. 16–17, 1990.

ROSS, R. E. “*The acoustics of the guitar: An anlysis of the effect of bracing stiffnes on resonance placement*”. Dissertação de mestrado, Northern Illinois University, 1979.

ROSS, R. E; ROSSING ,T. D. “*Plate vibrations and resonances of classical and folk guitars*”. J. Acoust. Soc. Am. 65, 72, 1979.

ROSSING, T. D. “*The Science of String Instruments*”, SPRINGER, 2011.



SADIE, S; TYRELL, J. "*The new Grove dictionary of music and musicians*", 2<sup>a</sup> ed. Oxford University Press, New York, 2001.

SCHELLING, J.C., "*The violin as a circuit*". Journal of the Acoustical Society of America. 35(3): p. 326-338, 1963.

SCHUBERT, E., WOLFE, J. "*Does timbral brightness scale with frequency and spectral centroid?*" Acta Acustica em parceria com Acustica 92(5), 820–825, 2006.

SEGERMAN, E. "*Some aspects of wood structure and function*". Journal of the Catgut Acoustical Society 4: 5–9, 2001.

SEGERMAN, E. "*Wood structure and what happened in the Hunt & Balsan experiment*". Fellowship of Makers and Researchers of Historical Instruments Quaterly 84, Communication 1471: 53–55, 1996.

SEGOVIA, A. "*Andres Segovia: An Autobiography of the Years 1893-1920*", Macmillan Pub Co, 1976.

SLIKER, A.; YU, Y.; WEIGEL, T.; ZHANG, W. "*Orthotropic elastic constants for eastern hardwood species*". Wood Fiber Sci. 26(1): 107–121, 1994.

SLOANE, I. "*Classic Guitar Construction*". Westport: Bold Strummer Ltd, 1989.

SOMOGYI, E. "*Tonewoods in Guitars*", artigo on-line disponível em: <<http://www.esomogyi.com/articles.html>>. Acessado em: agosto de 2010.

SOUZA, M. R. "*Madeiras para instrumentos musicais, Classificação Preliminar*". LPF-IBDF, Ministério da Agricultura. pp. 28, 1982.

STEVENS, K. N. "*Acoustic Phonetics*", MIT Press, Cambridge, MA, 1999.

SUNDBERG, J. "*The Science of Musical Sound*", 3<sup>a</sup> ed, 1989. Tradução para o inglês pela Academic Press, San Diego, 2001.

The Society for Ethnomusicology. "*What is Ethnomusicology?*". Disponível em:

<<http://www.ethnomusicology.org/?page=whatisethnomusicol>>. Acesso em: 09 de outubro 2010.

TRAUBE, C. “*An Interdisciplinary Study of the Timbre of the Classical Guitar*”. Tese (PhD em Música) McGill University, Montreal, 2004.

UNSWTV. “*Roboclarinet*”. Vídeo disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=mAIeTm4IO5Q#t=19>>. Acesso em: 17 dez 2010. Mais informações em: <<http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetrobot.html>>

WEGST, U.G.K. “*Wood for sound*”. American Journal of Botany, 93 (10), 1439-1448, 2006.

WESSEL, D. “*Timbre space as a musical control structure*”, Computer Music Journal, 3, pp. 45–52, 1979.

WOOD HANDBOOK. “*Wood handbook: wood as an engineering material*”. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, EUA, 2010.

WRIGHT, H. “*The Acoustics and psychoacoustics of the guitar*”. Tese de doutorado. University of Wales, College of Cardiff, 1996.

YANO, H., Y; FURUTA; NAKAGAWA, H. “*Materials for guitar back plates made from sustainable forest resources*”. Journal of the Acoustical Society of America 101: 1112–1119, 1997.

ZIERL, B. “*Obtaining the perfect violin sound with fungi*”. Site <[http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/40307/---/l=2](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/40307/---/l=2)> 2005. Acesso: 28 julho 2010.